

Pekka Holopainen

Kaupunkiverkon keskijännitekaapeleiden kuormitettavuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

2.2.2016

Tekijä Otsikko	Pekka Holopainen Kaupunkiverkon keskijännitekaapeleiden kuormitettavuus
Sivumäärä Aika	46 sivua + 2 liitettä 2.2.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Käytönsuunnittelupäällikkö Ari Sipiläinen, Helen Sähköverkko Oy Lehtori Tuomo Heikkinen, Metropolia Ammattikorkeakoulu
<p>Työn tarkoituksena oli tutkia kaupunkiverkon keskijännitekaapeleiden kuormitettavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä päivittää käytönvalvontajärjestelmässä käytetyt kuormitettavuusrajat nykyisen keskijänniteverkon mukaisiksi. Idea aiheeseen syntyi Helen Sähköverkko Oy:n käytössä olevista kuormitettavuusrajoista, jotka ovat pysyneet samoina jo vuosikymmenien ajan.</p> <p>Työssä keskitytään pääasiassa AHXAMK-W-tyyppisillä kaapeleilla rakennettuihin keskijänniteverkkoihin. Aluksi eritellään kaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttavia tekijöitä, jonka jälkeen tarkastellaan koko keskijänniteverkon kuormitettavuutta. Työssä on myös verkko-yhtiöille suunnatun kyselyn pohjalta tehty yhteenveto Suomen kaupunkiverkkojen kuormitettavuusrajojen käytöstä ja määrittämisestä.</p> <p>Suurin kuormitusvirta kohdistuu sähköasemalta lähteviin kaapeleihin, ennen virran jakautumista pienjänniteverkkoon jakelumuuntajien kautta. Kuormitettavuuden tarkastelu aloitettiin näiden suurimman kuormitusvirran vaikutuksen piirissä olevien kaapelireittien osalta. Kuormitettavuutta mallinnetaan standardin SFS 5636 -taulukoita ja Senerin verkostosuositus SA 5:94:ää soveltaen.</p> <p>Suurimman kuormitusvirran vaikutusalueen heikoimmaksi kohdaksi kuormitettavuuden kannalta osoittautui SFS 5636 -standardin menetelmillä määritettynä putkitettu maahan asennettu maakaapeli. Tämän selvityksen pohjalta työssä määritettiin ehdotus Helen Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkon uusista kuormitettavuusrajoista putkitettujen AHXAMK-W-tyyppisten maakaapeleiden kuormitettavuuden mukaan. Työssä pohditaan myös mahdollisia jatkotoimenpiteitä uusien kuormitettavuusrajojen käyttöönottoa varten, ja kuormitettavuusrajojen soveltamistapoja.</p>	
Avainsanat	Helen Sähköverkko Oy, Keskijänniteverkko, Kuormitettavuus, Kuormitettavuusraja, Keskijännitekaapeli

Author Title Number of Pages Date	Pekka Holopainen Load capacity of the medium voltage cables in the urban network 46 pages + 2 appendices 2 February 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Ari Sipiläinen, Head of Network operational planning, Helen Electricity Networks Ltd Tuomo Heikkinen, Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences
<p>This Bachelor's thesis was made for Helen Electricity Networks Ltd, Network operation unit in Helsinki. The objective of this thesis was to study the load capacity of medium voltage cables in urban network and the factors affecting it. Another objective was to update the existing load capacity limits to meet the current medium voltage network's load capacity.</p> <p>Load capacity limits used in <i>SCADA (supervisory control and data acquisition)</i> have been the same for decades, even though cable properties have changed. Therefore it is necessary to define the limits again. This thesis focuses mainly on the medium voltage distribution networks built with AHXAMK-W type medium voltage cables. A summary of the use of load capacity limits in Finland in general is also included into the thesis.</p> <p>The maximum load current is directed through cables between substation and loaded distribution transformer. Study of the load capacity of the medium voltage cables was started from cable routes affected with the maximum load currents. Load capacity of the medium voltage cables is modelled with the <i>Finnish national standard SFS 5636</i> and with the <i>Sener's recommendation of the electricity network SA 5:94</i>.</p> <p>The weakest point in terms of load capacity of the Helen Electricity Networks Ltd's medium voltage network is cables in unfilled plastic tubes according to the calculations based on SFS 5636. Proposals for the new load capacity limits for the grids built with AHXAMK-W cables were made according to previous studies. Measures which are necessary to execute before commissioning of the new load capacity limits have also been discussed in this thesis.</p>	
Keywords	Load capacity, Load capacity limits, Distribution network, Medium voltage cable, Medium voltage network

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Helen Sähköverkko Oy	2
3	Sähkönjakelujärjestelmä	4
3.1	Maasta erotettu verkko	5
3.2	Sammutettu verkko	6
4	Kaapeleiden kuormitettavuus	8
4.1	Keskijänniteverkon kaapelit	8
4.2	Kaapelihäviöt	10
4.3	Terminen kuormitettavuus	11
4.4	Hätäkuormitettavuus	12
5	Helen Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkko	13
5.1	Kuormitusvirran jakautuminen	16
5.2	Sähköasemälähdöt	17
5.3	Poikkeuskytkentätilanteet	20
6	Kaapeleiden jatkuva kuormitettavuus	23
6.1	SFS 5636	23
6.2	Jatkuva kuormitettavuus eri asennusolosuhteissa	25
6.2.1	Kaapelikellariin asennetut kaapelit	25
6.2.2	Muuntamoihin asennetut kaapelit	27
6.2.3	Maahan asennetut kaapelit	27
6.2.4	Putkitetut maahan asennetut kaapelit	30
6.2.5	Kaapeliläpiviennit	31
6.3	Kuormitettavuuksien vertailu	32
7	Kuormitettavuusrajat	33
7.1	Kuormitettavuusrajat Suomessa	33
7.2	Kuormitusvirran vuorokausivaihtelu	34
7.3	Kuormitettavuusrajojen määrittäminen	36

7.4	Rajojen muutosten vaikutus	40
8	Yhteenveto	41
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1. Kaapelin kuormitettavuus läpiviennissä	
	Liite 2. Kuormitettavuuslaskennan taulukot	

Lyhenteet ja termit

AXW240	Kolmivaiheinen keskijännitevoimakaapeli AHXAMK-W 3x240+70
AXW300	Kolmivaiheinen keskijännitevoimakaapeli AHXAMK-W 3x300+70
C	Kapasitanssi
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization.</i> Eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö
$\cos \varphi$	Tehokerroin
HSV	Helen Sähköverkko Oy
I	Vaihevirta
I_c	Kapasitiivinen loisvirta
I_f	Vikavirta
I_L	Induktiivinen loisvirta
I_R	Pätövirta
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i> Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
Km/W	Lämpöresistiivisyys
L	Induktanssi
P	Pätöteho
P_h	Pätötehohäviö
PE	Polyeteeni
PEX/XLPE	Ristisilloitettu polyeteeni, kaapeleiden eristemateriaalina käytettävä muovilaatu
Prysmian Finland Oy	Yksi maailman suurimmista energia- ja telekaapelivalmistajista. Kuuluu Prysmian Group -konserniin

R	Resistanssi
R_f	Vikaresistanssi
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> . Käytönvalvontajärjestelmä
Sener	Sähköenergialiitto ry Sener. Sähkökaupan ja verkkotoiminnan tutkimus-, kehitys ja opetustoiminnan edistäjä Suomessa
SFS	Suomalainen kansallinen standardijärjestelmä
Trimble NIS	Verkkotietojärjestelmä
U	Pääjännite
Ω/m	Ominaisresistanssi

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä perehdytään kaupunkiverkon keskijännitekaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttaviin tekijöihin ja tutkitaan käytönvalvontajärjestelmässä käytettävien kuormitettavuusrajojen oikeellisuutta. Kaapeleiden ylikuormittumista valvotaan sähköasemalähtöjen virtamittausten ja lähdöille määriteltujen kuormitettavuusrajojen avulla. Työn tavoitteena on päivittää käytössä olevat kuormitettavuusrajat nykyistä keskijänniteverkkoa vastaaviksi.

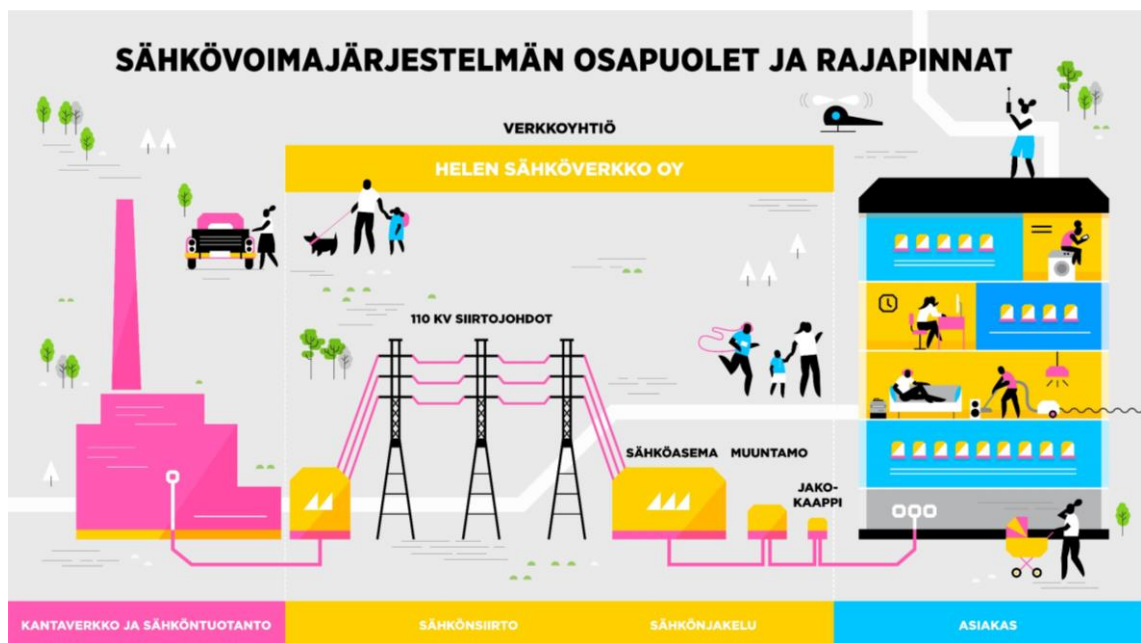
Helen Sähköverkko Oy:n (HSV) keskijänniteverkolle on määritelty kuormitettavuusrajat vuosikymmeniä sitten, minkä jälkeen verkon rakenne ja käytettävät kaapelityypit ovat muuttuneet huomattavasti. Muutosten seurauksena myöskään verkon ominaisuudet kuormitettavuuden näkökulmasta eivät ole pysyneet samana. Helsingin keskijänniteverkkoon asennettiin ensimmäiset muovieristeiset AHXAMK-W-tyyppiset maakaapelit vuonna 1986, öljypaperieristeisten kaapeleiden valmistuksen lopettamisen jälkeen. AHXAMK-W-tyyppisten kaapeleiden asennus on jatkunut tähän päivään asti, ja nykyisin merkittävä osa HSV:n keskijänniteverkosta onkin muovieristeisillä maakaapeleilla toteutettu. Tämän merkittävän muutoksen jälkeen ei ole tehty tarkempia määritelmiä ja muutoksia käytettäviin kuormitettavuusrajoihin.

Keskijänniteverkon kuormitettavuuteen vaikuttaa muun muassa kaapelin rakenne, asennustapa, asennussyvyys, lähellä sijaitsevien kaapeleiden ja kaukolämpöputkistojen lämmittävä vaikutus sekä ympäröivän aineen lämpöresistiivisyys. Verkon kuormitettavuutta määriteltäessä tuleekin löytää se verkon kohta, mikä on kuormitettavuusominaisuuksien kannalta heikoin. HSV:n keskijänniteverkko on rakenteeltaan silmukoitu. Tämä lisää verkon käytön soveltamis mahdollisuuksia sekä vähentää kuorman tasaisen jakautumisen myötä yksittäisillä kaapelilähdöillä olevaa kuormitusta.

Suurimmat kuormitusvirrat syntyvät poikkeuskytkentätilanteissa, joita syntyy verkon vikojen ja suunniteltujen huoltotoimenpiteiden seurauksena. Vaativimmat tilanteet verkon kuormitettavuuden kannalta syntyvät kokonaisen sähköaseman kuormat siirrettäessä keskijänniteverkon kautta muiden sähköasemien syötön piiriin. Kyseisestä tilanteesta selviäminen ilman ylikuormitusta kaikkien sähköasemien kohdalla, on yksi keskijänniteverkon suunnittelun tavoitteista.

2 Helen Sähköverkko Oy

Helen Sähköverkko Oy (HSV) on osa Helsingin kaupungin omistamaa Helen-konsernia. Konserniin kuuluvat myös tytär- ja osakkuusyhtiöt Oy Mankala Ab, Kiinteistösaakeyhtiö Helsingin Sähkötalo, Suomen Energia-Urakointi Oy, Suomen Merituuli Oy, Vantaan Energia Oy, Voimapiha Oy ja Finestlink Oy. HSV toimii Helsingin alueen jakeluverkon haltijana lukuun ottamatta Sipoon uutta liitosaluetta. Yhtiön tehtävänä on Energiaviraston verkkoluvan mukaisesti hoitaa sähköverkkotoimintaa ja tuottaa sähkön siirto- ja jakelupalveluja toimialueellaan. HSV:n toimialue on havainnollistettu *kuvassa 1*. Kuvasta nähdään HSV:n hallinnoiman verkon rajautuvan alue- ja jakeluverkkoon. Yhtiön omistuksessa on myös ennen vuotta 1996 rakennetut liittymisjohdot tonttiosuuksien osalta. [1.]

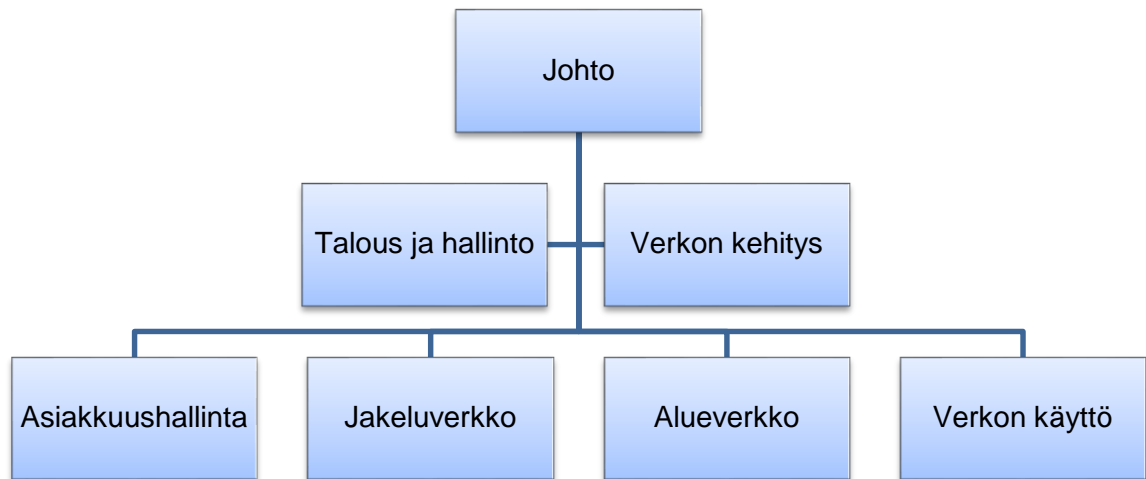


Kuva 1. Sähkövoimajärjestelmän osapuolet ja rajapinnat [4]

HSV:n liikevaihto vuonna 2014 oli 112 miljoonaa euroa, mikä tarkoittaa noin 14 %:n osuutta Helen-konsernin liikevaihdesta. HSV:llä on noin 375 000 asiakasliittymää, joiden vuosittainen sähkönkulutus on yhteensä noin 4500 GWh.

Yhtiössä työskentelee noin 100 henkilöä, ja toimipaikka sijaitsee Helsingin Käpylässä. HSV on käytännössä asiantuntijaorganisaatio, sillä se hankkii lähes kaikki toimintaan

tarvitsemansa työsuoritteet ostopalveluina konsernin sisäisiltä tai ulkoisilta kumppaneilta. Yhtiön organisaatioon kuuluu 6 yksikköä johdon lisäksi (kuva 2), joilla kaikilla on omat sisäiset organisaatorakenteensa.



Kuva 2. Organisaatorakenne [5]

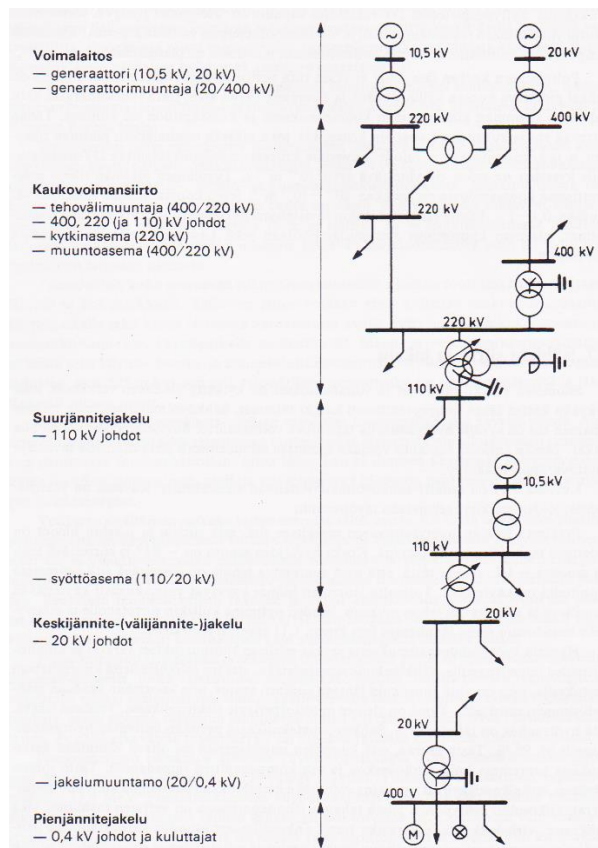
Verkon käyttö-yksikkö koostuu viidestä alueesta, joita ovat turvallisuus, käyttökeskus, jakeluverkon kunnossapito, käytön suunnittelu ja sähkövoimajärjestelmät. Verkon käytön vastuulla on kaikki HSV:n verkkoon liittyvä käyttötoiminta sekä jakeluverkon kunnossapito.

HSV:llä on 23 sähköasemaa, 199 km suurjännitteistä jakeluverkkoa, 1562 km keskijänniteverkkoa ja 4437 km pienjänniteverkkoa. [2; 3; 4; 5.]

3 Sähkönjakelujärjestelmä

Jakelujärjestelmä on kokonaisuus, jonka muodostaa kantaverkkoon (400 kV, 220 kV) liittyvä suurjännitteinen jakeluverkko (110 kV), sähköasemat (110/20 kV, 110/10kV), keskijänniteverkko (20 kV ja 10 kV), jakelumuuntamot (20/10/0,4 kV) sekä pienjänniteverkko (0,4 kV). Siirto ja jakeluverkoston periaatekaaviosta (Kuva 3) nähdään, kuinka verkoston eri alueet liittyvät toisiinsa. Suurjännitteinen jakeluverkko, toisin sanoen alueverkko, pitää sisällään 110 kV:n siirtojohdot ja laitteistot. Alle 110 kV:n verkkoa kutsutaan jakeluverkoksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sähköasemien keskijännitekojeistoja, keskijänniteverkkoa jakelumuuntamoinen ja pienjänniteverkkoa.

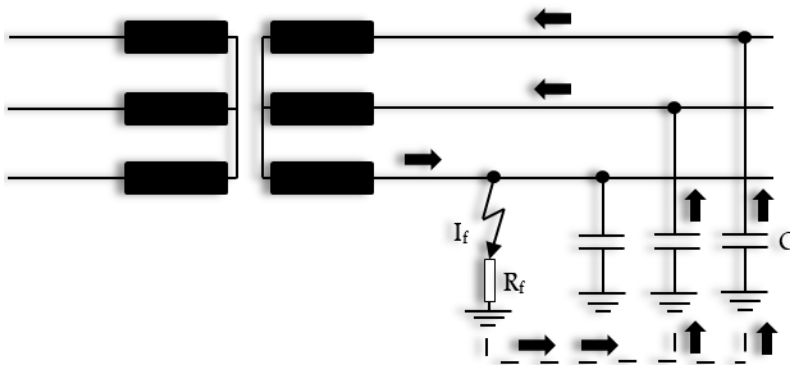
Suomen sähkönjakelujärjestelmän arvo on yli 12 mrd. €. Suurin osa jakeluverkoista on ajojohtorakenteista ilmajohtoverkkoa, mutta kiristyneet sähkömarkkinalait ja -asetukset painostavat kaapelointiasteen nostamiseen. Taajamissa ja kaupungeissa käytetään pääsääntöisesti maakaapeliverkkoa. Pienjänniteverkoissa käytetään maakaapeleiden lisäksi myös AMKA-ilmakaapeleita. [6, s. 11-13; 7.]



Kuva 3. Siirto- ja jakeluverkoston periaatekaavio [7]

3.1 Maasta erotettu verkko

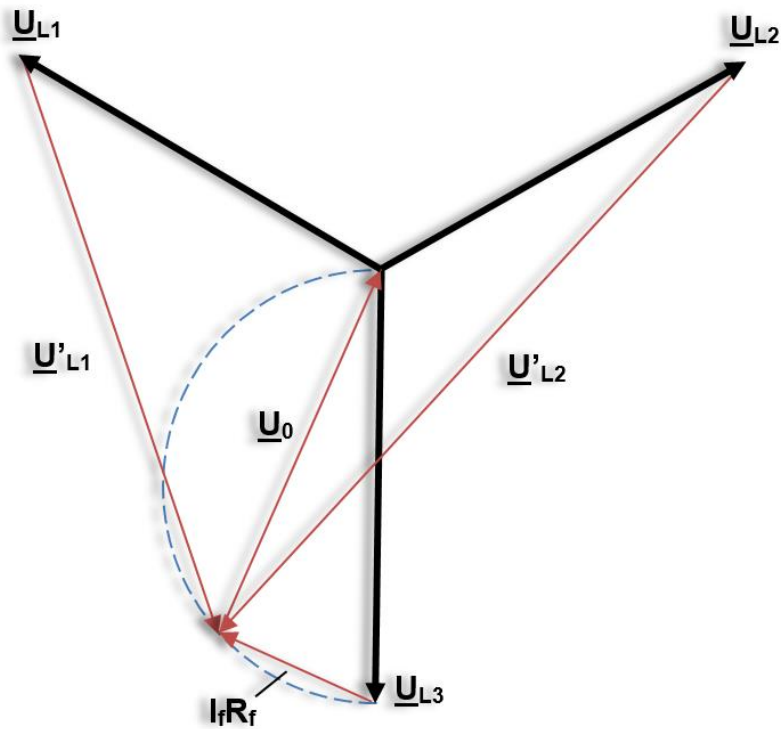
Maasta erotetulla verkolla ei ole yhteyttä maahan sen muuntajan tähtipisteen kautta. 1-vaiheiselle maasulkuvirralla ei ole pieni-impedanssista kulkureittiä, vaan vikavirta kulkee johtojen maakapasitanssien ja terveiden vaiheiden impedanssien kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä viallisen vaiheen impedanssin kautta vikapaikkaan *kuvan 4* osoittamalla tavalla. Maasta erotetun verkon vikavirrat määräytyvät vikaresistanssin, maakapasitanssien ja syöttävän päämuuntajan perässä galvaanisesti yhdessä olevan verkon pituuden mukaan. Maadoitetun verkon maasulkuvirtoihin verrattuna vikavirrat ovat pieniä (1-200 A). Verkon käyttöä voidaankin usein jatkaa jännitteisenä, jos kosketusjännitteet pysyvät alhaisina.



Kuva 4. Maasta erotetun verkon 1-vaiheinen maasulku [8]

Suomen maaperän keskimääräinen ominaisresistanssi on $2300 \Omega/\text{m}$. Suurin syy maasta erotetun verkon käyttöön Suomessa onkin maaperän huono johtavuus, mikä kasvattaa syntyviä maadoitus- ja kosketusjännitteitä. Kosketusjännite on riippuvainen maasulkuvirrasta, maan ominaisresistanssista sekä vikaresistanssista.

Maasulkutilanteessa tähtipisteen jännite lähtee nousemaan maata vasten, kohti vaihejännitettä, vikaresistanssin suuruudesta riippuen. Tähtipisteen potentiaalipoikkeamaa kutsutaan nollajännitteeksi. Vikaresistanssin ollessa nolla tähtipisteen nollajännite nousee vaihejännitteen suuruiseksi, ja terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat pääjännitteen suuruiseksi *kuvan 5* osoittamalla tavalla.

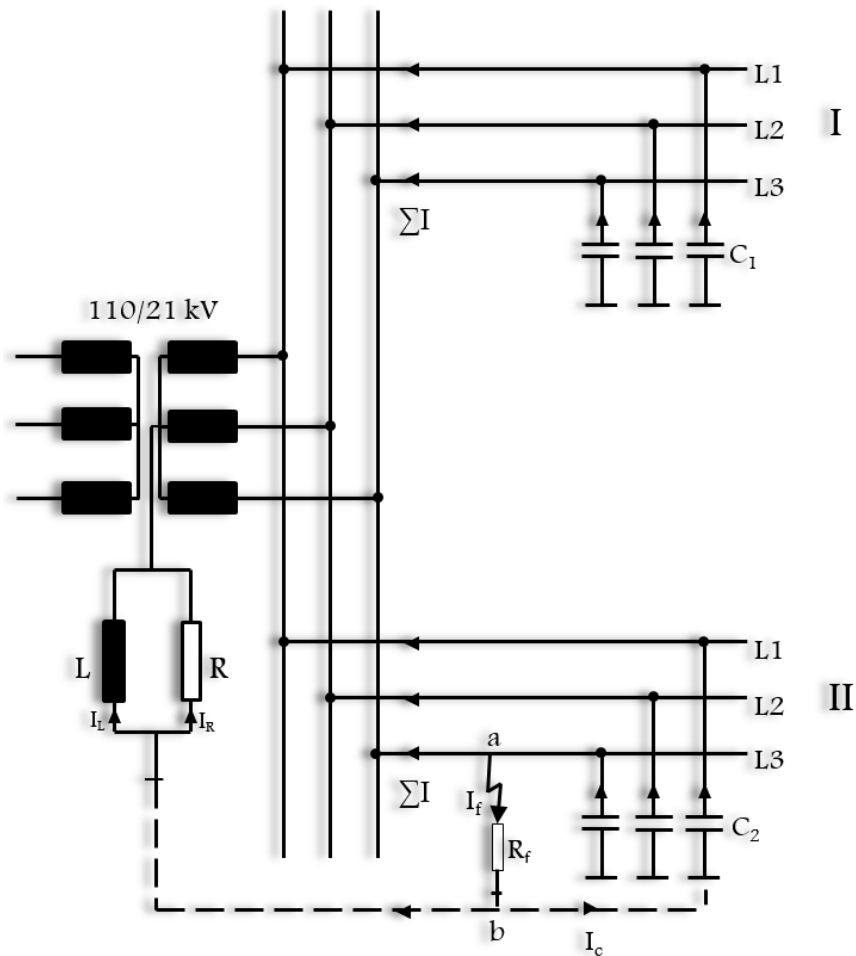


Kuva 5. Maasulun aikaiset jännitteet [6]

Maasulun aiheuttama keskijänniteverkon epäsymmetria ei näy pienjänniteverkossa, kun jakelumuuntajan ensiökäämit on kytketty kolmioon. Käämien yli vaikuttava jännite on tällöin pääjännitteen suuruinen niin kuin verkon normaalitilassakin. Pienjännitepuolella jännitteet poikkeavat huomattavasti normaalista, jos syöttävän keskijänniteverkon yksi vaihe on poikki ilman maakosketusta. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi virheellisestä toiminnasta, jossa kolmivaiheisen katkaisijan yksi vaihe jää virheellisesti auki kiinni kytkettäessä. [6, s. 182-190; 9; 8; 10.]

3.2 Sammutettu verkko

Sammutetussa verkossa muuntajan tähtipiste kytketään induktanssin kautta maahan. Usein induktanssi on säädettävä maakapasitanssit kompensoiva reaktori eli Petersenin-kela. Kelan tarkoitus on kompensoida maasulun aiheuttamaa kapasitiivista maasulkuvirtaa tuottamalla vastakkaissuuntaista induktiivista virtaa. Kuvassa 6 vikavirta I_f on pieni, koska virrat I_L ja I_C ovat vastakkaissuuntaiset.



Kuva 6. Sammutetun verkon maasulkuvirrat [6]

Sammutetulla verkolla voidaan siis pienentää maasulkuvirtaa, maadoitusjännitteitä ja sitä kautta kosketusjännitteitä. Avojohtoverkossa maasulun seurauksena syttynyt valo-kaari voi sammua itsestään pienen maasulkuvirran ansiosta, mikä vähentää pikajälleen-kytkennöistä aiheutuvien lyhyiden keskeytysten määrää.

Kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti, hajautetusti tai molempia tapoja käyttäen. HSV:n verkossa maasulkuvirran kompensointi on toteutettu keskitetysti. Keskitetyssä keskijänniteverkon kompensoinnissa Petersenin-kela sijoitetaan sähköasemalle päämuuntajan tähtipisteeseen, ja muuntajan syöttämä verkko kompensoidaan kokonaisuudessaan sähköasemalla. [6, s. 182-190; 9]

4 Kaapeleiden kuormitettavuus

Kaapeleiden kuormitettavuus ei ole yksiselitteinen asia vaan monen tekijän summa. Kuormitettavuuteen vaikuttavat muun muassa kaapelin rakenne, asennustapa, asennussyvyys, lähellä sijaitsevien kaapeleiden ja kaukolämpöputkistojen lämmittävä vaikutus ja ympäröivän aineen lämpöresistiivisyys. [11, s. 316.]

4.1 Keskijänniteverkon kaapelit

Keskijänniteverkossa käytössä on joko öljypaperieristeisiä tai PE-muovieristeisiä maakaapeleita. PE-muovieristeisistä kaapeleista yleisin on PEX-eristeinen maakaapeli. Muovieristeiset kaapelit tulivat käyttöön öljypaperieristeisten kaapeleiden rinnalle 1960-luvulla, jonka jälkeen suuntaus on ollut vahvasti muovieristeisten kaapeleiden suuntaan. 1980-luvulla Suomessa päätettiin lakkauttaa paperieristeisten keskijännitekaapeleiden valmistus kokonaisuudessaan, minkä jälkeen Helsinkiin asennettiin vuonna 1986 ensimmäiset AHXAMK-W-tyyppiset maakaapelit. [11, s. 303; 12.]

HSV:n keskijänniteverkossa on käytössä nykyisin pääosin AHXAMK-W 3x240 (AXW240)-alumiinivoimakaapeleita. Uusien sähköasemien kohdalla käytetään paloturvallisuuden ja tulevaisuudessa mahdollisesti kasvavan kuormituksen vuoksi myös halogeenittomia AHXAMK-W 3x300 (AXW300)-kaapeleita, keskijännitelähtöjen ja niiden syöttämien ensimmäisten muuntamoiden välillä. AXW300-kaapelin käytössä on Kluuvin sähköaseman kohdalla otettu huomioon myös alueen korkea kuormitustiheys. Keskijänniteverkossa on vielä runsaasti vanhoja APYAKMM-öljypaperieristeisiä maakaapeleita sekä joitain armeerattuja PLKVJ- ja PYLKVJ -maakaapeleita.

AHXAMK-W

Kolmivaiheinen AHXAMK-W on yleisin keskijänniteverkossa käytettävä kaapelityyppi. Kaapeli koostuu kolmesta vaipatusta vaihejohtimesta, jotka on kerrattu nollajohtimena toimivan pyöreän kuparisen keskusköyden ympärille. Vaihejohdin on pitkittäisvesitiivis alumiinijohdin ja sen tehtävänä on toimia kulkutienä kuormitusvirralle. Johdinta ympäröi polyeteenistä koostuva puolijohtava johdinsuoja ja sen päällä on ristisilloitetusta polyeteenistä (PEX) koostuva eristekerros. Eristekerroksen päällä on puolijohtavasta poly-

eteenimuovista koostuva hohtosuoja, joka tasoittaa johtimen pinnanmuodosta aiheutuneet epätasaisuudet, ja näin homogenisoi eristekerroksen yli vaikuttavaa sähkökenttää. Hohtosuojan päällä on vesitiivistysnauha, joka paisuu veden vaikutuksesta muodostaen esteen veden pitkittäiselle etenemiselle. Vesitiivistysnauhan päällä on alumiinimuovilaminaatista koostuva kosketussuoja, minkä tehtävänä on johtaa indusoituneet virrat ja vikavirrat maahan sekä estää ulkopuolisten virtojen pääsy vaihejohtimiin. Kosketussuoja toimii myös vesitiivistyksenä poikittaissuunnassa. Näin ollen AHXAMK-W on poikittais- ja pitkittäissuunnassa vesitiivis. Kaapelin uloimpana kerroksena on polyeteeni (PE) vaippa, joka toimii kaapelin mekaanisena suojana ulkopuolisia rasituksia vastaan. [13; 14.]



Kuva 7. AHXAMK-W kaapelin rakenne. 1 johdin 2 johdinsuoja, 3 eriste, 4 hohtosuoja, 5 vesitiivistysnauha, 6 kosketussuoja (alumiinilaminaattinauha), 7 vaippa ja 8 keskusköysi. [13]

Taulukko 1. AHXAMK-W kaapelin ominaisuuksia [14; 15.]

Johdin	Vesitiivis, pyöreä alumiiniköysi
Johdinsuoja	Puolijohtava polyeteenimuovi
Eristys	PEX-muovi
Hohtosuoja	Puolijohtava polyeteenimuovi
Vesitiivistys	Poikittais ja pituussuunnassa
Kosketussuoja	Alumiini-muovilaminaatti, toimii myös poikittaissuunnan vesitiivistyksenä
Vaihevaippa	PE-muovi
Keskusköysi	Tiivistetty pyöreä kupariköysi
Jännitetasot (kV)	10, 20, 30
Johtimen suurin käyttölämpötila maassa (°C)	65
Johtimen suurin käyttölämpötila ilmassa (°C)	90

4.2 Kaapelihäviöt

Johdinhäviöt

Kaapelihäviöitä syntyy sekä virran että jännitteen vaikutuksesta. Suurin osa häviöistä syntyy kaapelin johtimissa. Johtimissa tapahtuva häviöteho määräytyy ohmin lain mukaan virran ja resistanssin suuruudesta *yhtälön 1* esittämällä tavalla.

$$Ph = RI^2 \quad (1)$$

Ph on pätötehohäviö, R on johtimen resistanssi ja I on yhden johtimen vaihevirta. Resistanssin pienentäminen kaapelin paksuutta lisäämällä pätee suoraan vain tasavirtakaapeleihin. Vaihtovirralla resistanssiin vaikutta merkittävästi myös virran taipumus pakkautua johtimen reunoihin, jonka seurauksena johtimen pintakerroksissa virrantiheys on suurempi kuin sisäosissa. Tätä ilmiötä kutsutaan virranahtautumiseksi. Virran ahtautuminen on suoraan verrannollinen virran taajuuteen, joten taajuuden kasvaessa virran pakkautuminen johtimen pintakerrokseen voimistuu. Ahtautuminen kasvattaa johtimen häviöitä, sillä resistanssi kasvaa virran ahtautumisen vaikutuksesta. Ahtautumista pyritään hillitsemään kerratuilla johdinrakenteilla.

Virran epätasaista jakautumista johtimessa voi aiheuttaa myös lähellä olevien johtimien sähkökentät. Monijohdinkaapeleissa virta pakkautuu sille puolelle johdinta, joka on lähellä toista jännitteistä johdinta. Tämä ilmiö ei vaikuta AHXAMK-W-tyyppisillä kaapeleilla, sillä vaihejohtimien erilliset kosketussuojat estävät sähkökenttien leviämisen ympäristöön. Kaapelin resistiivisyyteen vaikuttaa myös sen lämpötila, joka kasvaa kaapelia kuormitettaessa. [13; 16.]

Dielektriset häviöt

Kaapelin eristeessä syntyvät dielektriset häviöt riippuvat jännitteen suuruudesta, eristemateriaalista sekä johtimen kapasitanssista. Dielektriset häviöt johtuvat kaapelin vuotoresistanssin häviöistä. Dielektriset häviöt keskijännitteellä ovat vain 1-2 % kokonaishäviöistä, joten yleisesti keskijännitekaapeleiden kuormitusta tarkasteltaessa näitä häviöitä ei tarvitse ottaa huomioon. IEC 60287 mukaan PEX-eristeisten kaapeleiden dielektriset jännitteet tulee huomioida vasta yli 127 kV:n kaapeleilla. [17; 13, s. 12.]

Kosketussuojan ja vaipan häviöt

Tehohäviöitä tapahtuu myös kaapelin kosketussuojassa ja vaipassa. Resistiiviset häviöt syntyvät johtimissa kulkevan vaihtovirran aiheuttaman muuttuvan magneettikentän indusoimista virroista kosketussuojan ja vaipan metalliosiin. Nämä indusoituneet silmukka- ja pyörrevirrat aiheuttavat tehohäviöitä. Kosketussuojan ja vaipan tehohäviöt ovat pieniä verrattuna kuormitusvirran aiheuttamiin häviöihin johtimissa. Kosketussuojan häviöt riippuvat myös sen maadoitustavasta. Molemmista päistä maadoitetun kosketussuojan tehohäviöt ovat pienemmät kuin muilla maadoitustavoilla toteutettujen kosketussuojien häviöt. [17; 13.]

4.3 Terminen kuormitettavuus

Keskijännitekaapeleiden kuormitettavuuden määrää suurin lämpötila, joka johtimelle voidaan sen materiaalin, eristyksen tai ympäristön vuoksi sallia [18, s. 39].

Termisellä kuormitettavuudella tarkoitetaan sitä, kuinka paljon tehoa kaapeli pystyy siirtämään niin, että tehohäviöistä aiheutuva lämpötilan nousu ei aiheuttaisi eristemateriaalissa pehmenemistä ja muodonmuutoksia. Eristemateriaalissa tapahtuvien muutosten seurauksena sen sähköiset ominaisuudet muuttuvat, ja tästä syystä ylikuormitettaessa kaapelin eristyskyky heikkenee, mikä voi johtaa johtimen ja kosketussuojan välisiin läpilyönteihin. Tehohäviöistä aiheutuvaan eristemateriaalin lämpötilan nousuun vaikuttaa eristeen ominaislämpökapasiteetti sekä lämmön siirtyminen johtimesta ympäristöön.

Kolmivaiheinen pätöteho saadaan *yhtälöstä 2*

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad (2)$$

missä U on pääjännite, I on vaihevirta ja $\cos \varphi$ on tehokerroin. Jakeluverkon jännitteen ollessa vakio ainoastaan virran suuruutta voidaan muuttaa. Kaapelin kuormitettavuus ilmaistaankin suurimman mahdollisen syötettävän virran avulla.

Virran aiheuttamat tehohäviöt lämmittävät kaapelia ja sen eristystä, minkä kautta lämpöenergia siirtyy ympäristöön. Kuormitettavuuteen vaikuttaakin olennaisesti myös kaapelin

kyky siirtää lämpöä ympäristöön, mistä johtuen esimerkiksi ilma- ja maa-asennuksissa kaapeleita ei voida kuormittaa samoilla virroilla. [13.]

4.4 Hätäkuormitettavuus

Senerin verkostosuositus SA 5:94:n mukaan palonkestävästi asennetulle kaapelille voidaan määrittää hätäkuormitettavuus poikkeuksellisia tilanteita varten. Tällaisia tilanteita voi syntyä esimerkiksi maasulkutilanteissa kumuloituneiden vikavirtojen kuormittaessa kaapeleita, tai keskijännitekojeiston erottimien vikaantuessa, jolloin silmukoidun verkon tehokas hyödyntäminen voi estyä. Korvauskytkentöjen aikaiset yhden sähköasemalähdön syöttöpiirissä olevat suuret kuormat voivat myös johtaa kaapeleiden ylikuormittumiseen.

Hätäkuormitettavuuden käsite on syytä selvittää sähköturvallisuusviranomaisilta ennen sen soveltamista käytäntöön, sillä verkostosuosituksilla ei ole samanlaista viranomaisasemaa kuin esimerkiksi SFS-standardeilla Suomessa. Hätäkuormituksessa ylitetään kaapelin normaalissa käytössä sallittu käyttölämpötila, mikä johtaa kaapelin eristysten tavallista nopeampaan vanhenemiseen. Tämän vuoksi hätäkuormituksen kesto ja määrä on syytä rajoittaa mahdollisimman pieneksi ja lyhytaikaiseksi. Hätäkuormituksesta aiheutuva kaapelin lämpötilannousu voi kuivattaa ympäröivää maata, mikä vaikuttaa heikentävästi maa-aineksen lämmönsiirtokykyyn. Usein maa-aines kuivuu epätasaisesti kaapelin ympärillä, mikä johtaa kaapelin epätasaiseen lämpökuormittumiseen lämmönsiirtokyvyn vaihtelun johdosta.

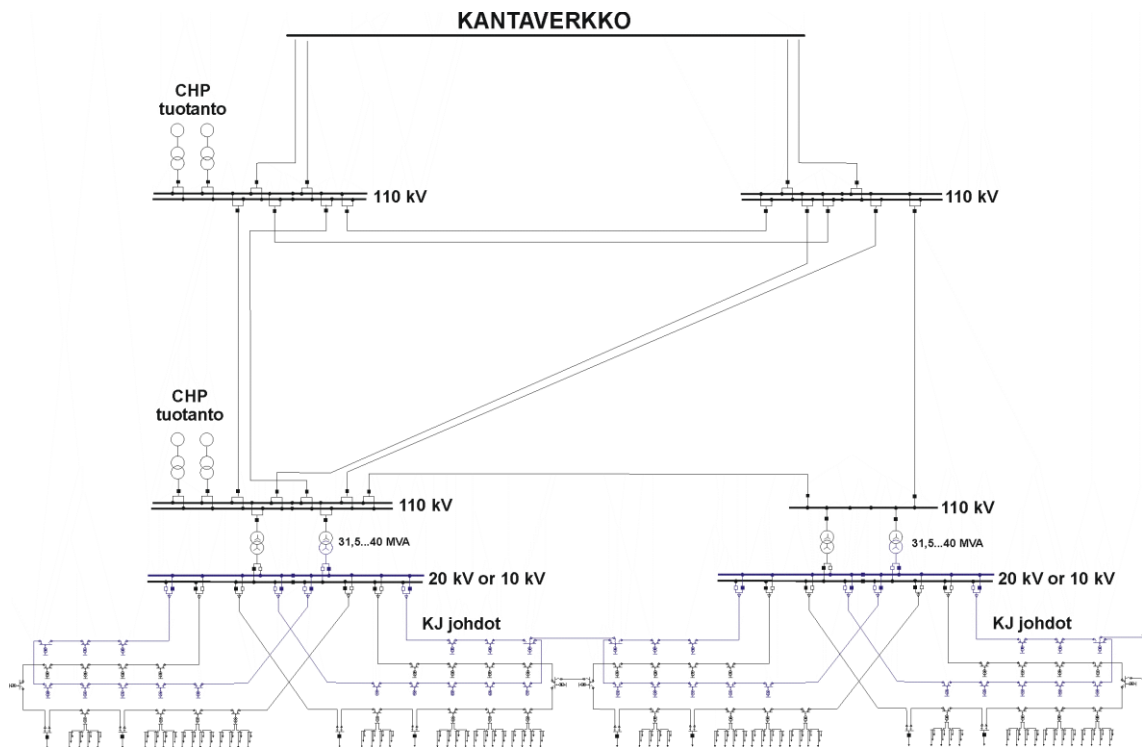
Hätäkuormitettavuutta voitaisiin soveltaa tarvittaessa tilanteisiin, joissa sähkönjakelu-keskeytystä ei voida estää ilman kaapeleiden lyhytkestoista ylikuormitusta. Hätäkuormituksen keston raja-arvoina voidaan pitää 50 tunnin jatkuvaa hätäkuormitusta ja enintään 500 tunnin hätäkuormitusta kaapelin koko käyttöiän aikana. [19, s. 7.]

Taulukko 2. Hätäkuormitettavuuskertoimet [19]

Kaapelityyppi	Johtimen maksimilämpötila hätäkuormituksella (°C)	Hätäkuormitettavuuskerroin	
		Kaapeli ilmassa +25 °C	Kaapeli maassa +15 °C
12-24 kV paperieristeinen	95	1,26	1,20
1-24 kV PEX-eristeinen	130	1,20	1,30

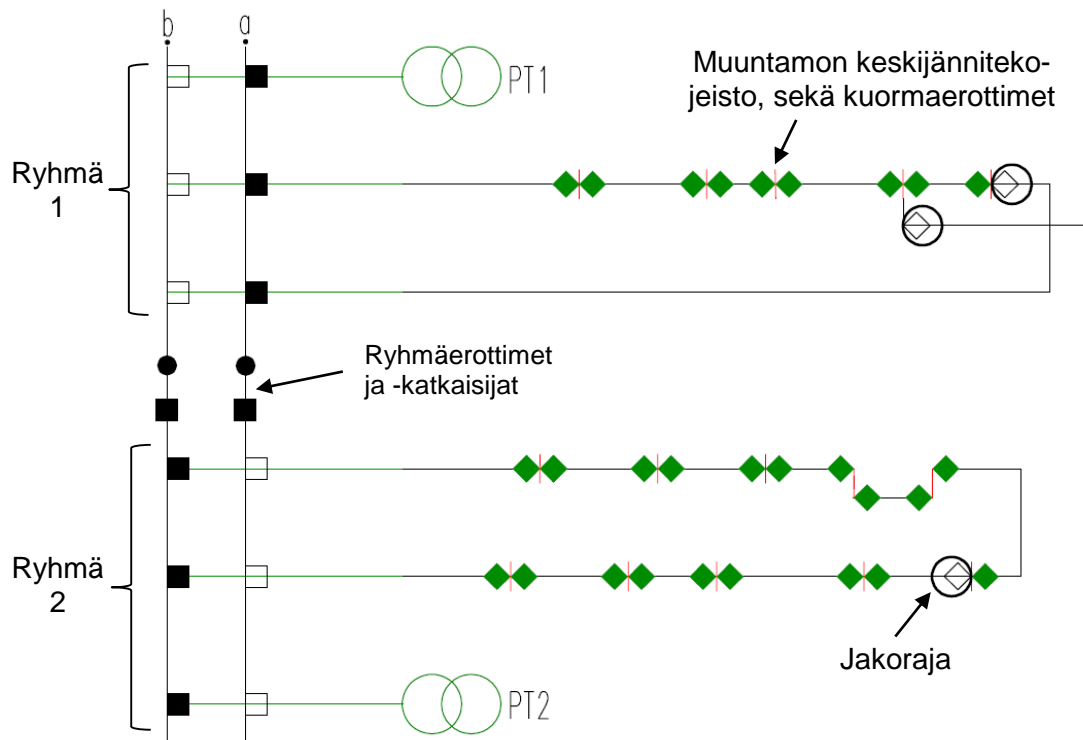
5 Helen Sähköverkko Oy:n keskijänniteverkko

HSV:n sähkönjakelujärjestelmä on 3 portainen (kuva 8). Kantaverkkoon ja Helsingin alueella toimiviin voimalaitoksiin yhteydessä oleva 110 kV:n suurjännitteinen jakeluverkko syöttää sähköasemia, jotka syöttävät keskijänniteverkkoa. Keskijänniteverkko syöttää jakelumuuntamoiden kautta puolestaan pienjänniteverkkoa ja siihen liittyviä asiakkaita.



Kuva 8. Helsingin sähköverkon rakenne [5]

Keskijänniteverkko Helsingin alueella on rakennettu lähes kokonaan rengasmaiseksi (kuva 9). Verkkoa käytetään suurjännitteisestä jakeluverkosta poiketen säteittäisenä, sillä säteittäisessä verkossa oikosulkuvirrat ovat pienemmät ja häiriöiden rajoittaminen on helpompaa. Myös jännitteen säätö sekä suojauksen toteuttaminen on yksinkertaisempaa kuin silmukoidussa verkossa. Rengaskäytön hyödyt olisivat pienemmät jännitteenalenemat ja energiahäviöt, mutta toistaiseksi niiden hyödyntämiseen ei ole ryhdytty kaupungin keskijännitekaapelivälien lyhyiden pituuksien johdosta.



Kuva 9. Rengasverkon periaatekuva kiskokäytössä

Rengas muodostuu kahdesta tai useammasta johtolähdöstä, jotka voivat olla saman sähköaseman kiskolla tai vasta-asemien välillä. Kiskostot on jaettu kahteen tai kolmeen ryhmään ja jokaisen ryhmän alueella on tyypillisesti yksi päämuuntaja, jolla voidaan syöttää sähköaseman molempia kiskoja. Näin verkon käyttövarmuutta saadaan parannettua esimerkiksi päämuuntaja ja kokoojakiskosto-vikoja varten.

Rengasverkkoa syötettäessä useammasta kuin kahdesta suunnasta puhutaan usein silmukaverkosta. HSV:n keskijänniteverkon käyttö on vakiintunut kiskokäytöksi (kuva 9), jossa sähköaseman yhdellä päämuuntajalla syötetään yhtä täydellistä kiskoa. Sähköasemia voidaan käyttää myös yksin-, rinnan- tai ryhmäkäytöllä. Ryhmäkäytössä kiskosto jaetaan ryhmäerottimien avulla osiin ja yhdellä päämuuntajalla syötetään kahta erillistä kiskon osaa eli yhtä ryhmää, toisen päämuuntajan syöttäessä toista ryhmää.

Verkon topologia pyritään suunnittelemaan siten, että silmukan lähdöt olisivat yhden päämuuntajan syöttöpiirissä, eli samalla kiskolla tai samassa ryhmässä. Tämä helpottaa jakorajakytkentöjen suorittamista, sillä saman päämuuntajan syöttöpiirissä olevien johtolähtöjen väliaikainen rengaskäyttö ei aiheuta riskiä tasoitusvirroille, eikä kahden päämuuntajan syötöstä aiheutuville tavallista suuremmille vikavirroille. Silmukkarakennetta hyödynnetään myös eri päämuuntajien ja sähköasemien välillä, mutta tällöin joudutaan

kytkiessä tasaamaan jännitteet ennen rengaskäytön käyttöönottoa. Tasoitusvirrat erisähköasemien välisen rengaskäytön kiinni kytkemisen yhteydessä voivat olla huomattavan suuria, sillä sähköasemien välisten kaapeleiden impedanssit ovat pieniä lyhyiden etäisyyksien takia. Keskijänniteverkon silmukoiturakenne parantaa verkon luotettavuutta ja on erityisen kannattavaa maakaapeliverkossa, jonka viankorjaus on hidasta.

Jopa yli 90 % sähkönkäyttäjille aiheutuvista jakeluhäiriöistä on peräisin keskijänniteverkossa tapahtuvista vioista. Näin ollen keskijänniteverkon toimivuus on hyvin merkittävä tekijä verkon käyttövarmuudessa. Rengasmaisen verkon avulla vikojen aiheuttamien asiakaskeskeytysten kestoaikaa saadaan lyhennettyä huomattavasti, sillä esimerkiksi kaapelivaurion aikana vikaväli voidaan erottaa terveestä verkosta jakorajaa siirtämällä ja silmukkamaisen verkon ansiosta sähköt saadaan palautettua kaikille asiakkaille vikaantuneen muuntamovälin jäädessä jännitteettömäksi. Rengasverkkoa käytetäänkin häiriötilanteissa vikapaikan eristämiseen ja huoltotöiden aikaiseen kytkentätilanteen keskeytyksettömään muuttamiseen. Osa kytkennöistä voidaan tehdä kaukokäytön avulla, jolloin vikapaikan erotus ja kytkentätilanteiden muutokset tapahtuvat hyvin nopeasti ja vaivattomasti.

HSV:n keskijänniteverkon jakelujännite kantakaupunkialueella on 10 kV, ja esikaupunkialueella 20 kV. Viikinmäen, Pukinmäen, Tapanilan, Kannelmäen, Ilmalantorin, Pasilan ja 2.2016 tulevan Herttoniemen 20 kV:n verkot on maadoitettu Petersenin kelan kautta maasulkuvirran kompensoimiseksi, muu 20 kV:n verkko ja koko 10 kV:n verkko on maasta erotettu. Koko 20 kV:n keskijänniteverkko on tarkoitus saada kompensoinnin piiriin vuoden 2018 loppuun mennessä.

Keskijänniteverkolla käytetään *taulukon 3* mukaisia kuormitettavuusrajoja verkon käytön tukena käytönvalvontajärjestelmässä.

Taulukko 3. HSV:n keskijänniteverkon kuormitettavuusrajat

	20 kV	10 kV
Kesä	230A	275A
Talvi	250A	295A

Taulukosta nähdään rajojen eroavan toisistaan eri jänniteportaissa, sekä eri vuodenaikoina. Kesän ja talven kuormitettavuuserot johtuvat ympäristön lämpötilaeroista, ja eri

jänniteportaiden kuormitettavuuserot tulevat vuosikymmeniä sitten eri jänniteportaissa käytettyjen erityyppisten kaapeleiden käytöstä. Kesä ja talvirajat muutetaan käytönvalvontajärjestelmään ennalta määrättyjen päivämäärien mukaan, kun taas sähköaseman päämuuntajien kuormitettavuusrajat määräytyvät ympäristön lämpötilan mukaan.[6, s. 125-126; 8, s. 29; 9; 12.]

5.1 Kuormitusvirran jakautuminen

Kaapeleiden kuormitettavuus tulee määrittää reitin jäähdytysolosuhteiltaan epäedullisimman osuuden mukaan. Johdinhäviöiden vaikutus kaapelin lämpenemiseen on aikaisemmin osoitettujen tietojen pohjalta suurin kuormitettavuutta heikentävä tekijä, joten keskitytään tarkastelemaan virran jakautumista keskijänniteverkossa. Keskijännitelähdöt on jaoteltu sähköaseman kiskoille lähtöjen teho ja asiakasmäärien mukaisesti siten, että ne olisivat mahdollisimman hyvässä tasapainossa keskenään. Lähdöltä virta kulkee ensimmäiselle muuntamolle, missä osa siitä jakautuu muuntajan kautta pienjänniteverkkoon siellä olevan kuorman mukaan. Jäljelle jäävä virta kulkee seuraavalle muuntamolle, jossa jälleen osa virrasta kulkee muuntamon kautta pienjänniteverkkoon. Suurin kuormitusvirta on siis sähköasemalähdön ja sen syöttämän kuormassa olevan ensimmäisen muuntamon välisessä kaapelissa. [19, s. 6.]

Kahdella eri sähköasemalähdöillä syötettyä ja keskijännitekojeistolla varustettua muuntamoita voidaan käyttää myös kytkemönä. Tällaisessa tilanteessa muuntamon pienjännitekojeistoa syötetään vain toisen keskijännitekojeiston kautta. Kytkemönä käytetyltä keskijännitekojeistolta lähtevän kaapelin kuormitusvirta on yhtä suuri kuin sitä syöttävän kaapelin kuormitusvirta. Suurimman kuormitusvirran vaikutus jatkuu tällöin kytkemöltä seuraavalle muuntamolle, jolloin myös ensimmäiseltä muuntamolta seuraavalle lähtävä kaapeliväli tulee huomioida kuormituksen tarkastelussa.

Taulukko 4 havainnollistaa virran jakautumista Kampin sähköaseman lähdöillä. Arvot on laskettu muuntamoille summattujen käyttöpaikkojen tuntimittaustietojen pohjalta Trimble NIS -verkkotietojärjestelmän avulla.

Taulukko 4. Kampin sähköasemalähtöjen kuormitusvirran jakautuminen

Lähtö	Lähdön kuormitusvirta (A)	Ensimmäiseltä muuntamolta lähtevä kuormitusvirta (A)	Virranmuutos
E02	46	30	-16
E03	31	12	-19
E06	174	157	-17
E08	97	50	-47
E09	44	34	-10
E14	89	76	-13
E19	98	77	-21
E32	66	50	-16
E33	53	45	-8
E34	150	99	-51
E37	138	105	-33
E43	105	80	-25
E44	72	61	-11

Jos lähdön syöttämän muuntamon keskijännitekojeiston kautta syötetään kuormitettua muuntajaa, voitaisiin näiden tulosten perusteella olettaa sen pienentävän muuntamolta seuraavalle lähtevää kuormitusvirtaa vähintään 8 A:lla. Jotkut verkkoyhtiöt olettavat suunnittelussa kuormitusvirran vähenevän 20 A:lla, ja jotkut 10 A:lla. [20.]

5.2 Sähköasemalähdöt

Sähköaseman keskijännitelähdöt alkavat keskijännitekojeistosta, jossa kaapelipäätteet ovat kytkettynä aseman kiskostoon katkaisijakentän kautta. Asemalta lähtevät keskijännitekaapelit kulkevat läpivientien kautta sähköaseman kaapelikellariin (*kuva 10*), josta kaapelit viedään ulkoseinän läpivientien kautta rakennuksen ulkopuolelle. Joidenkin sähköasemien lähdöt asennetaan palonkestävillä halogeenittomilla kaapeleilla. Tämä lisää asemien paloturvallisuutta, ja suojaa muita aseman kojeistoja ylikuormitustilanteissa syntyviltä kaapelipaloilta.

Kaapelikellari on sähköaseman kojeistojen ja maanpinnan alapuolella oleva tila, jonka kautta kaikki asemalle tulevat ja lähtevät kaapelit kulkevat. Kaapelikellarit ovat kuormitettavuuden kannalta huomioon otettavia kohteita, sillä suuret kaapelimäärät yhdessä tilassa lämmittävät toisiaan ja heikentävät toistensa kuormitettavuutta. [21.]



Kuva 10. Sähköaseman keskijännitekojeistosta kaapelikellariin laskevat kaapelit

Päätteet

Sähköaseman keskijännitelähdössä olevan kaapelipäätteen tehtävä on kaapelin johtimen kytkeminen keskijännitekytkinkennoon estäen mahdollisen kosteuden pääsyn kaapeliin ja antaen kaapelille tarvittava mekaaninen suoja. Kaapelipäätteen tehtävänä on myös ohjata kaapelin päähän syntyvää sähkökenttää vähentäen sähkökentänmuutoksista syntyviä rasituksia. Päätteissä tapahtuvat sähkökentän muutokset eristyksen rajapinnassa aiheuttavat ongelmia ajoittain jo kuormitettavuusrajoja pienemmilläkin virroilla. Nämä sähkökentän muutokset syntyvät jännitteen rasituksista, joita esimerkiksi hohtosuojan päättyminen aiheuttaa. Sähkökentän muutoksia pyritään loiventamaan muotoilemalla päätteiden eristyksiä, sekä käyttämällä puolijohtavia kerroksia johtimen päällä. HSV:n keskijännitekojeistoissa on käytössä kojeistojen rakenteesta riippuen suoria päätteitä ja kulmapistokepäätteitä. Kaapelipäätteen tulee täyttää vähintään samat tekniset vaatimukset kuin kaapelin ja näin ollen kaapelin kuormitettavuutta mitoittaessa kaapelipäätteitä ei tarvitse huomioida lainkaan. [22; 7; 23.]

Läpiviennit

Läpiviennillä tarkoitetaan seinään, lattiaan tai kattoon tehtävää reittiä, jonka läpi kaapeli kulkee. Usein HSV:n sähköasemilla läpivienti on porattu reikä, johon kaapeli tiivistetään polyuretaanivaahdolla tai palonkestävällä massalla (*kuva 11*). Läpivientien kohdalla kaapeli voi lämmetä paikallisesti, ja järjestelmän kuormitettavuus voi alentua. Läpivientien tiivistykseen on olemassa massoja, joiden lämmönsiirtokyky on parempi kuin polyuretaanivaahdolla. Hyvän lämmönsiirtokyvyn omaavia tiivistysmassoja käyttämällä voitaisiin minimoida läpivienneissä tapahtuvaa kaapelin paikallista lämpenemistä. Saatavilla on myös erilaisia valmiita vesitiiviitä läpivientejä, joiden käyttö AHXAMK-W-tyyppisten kaapeleiden kohdalla on kuitenkin suhteellisen hintavaa ja haastavaa, sillä ne on usein suunniteltu keskusköydettömille yksittäisille kaapeleille. Tästä syystä tiivistys tehdäänkin tois- taiseksi helposti muotoiltavilla vaahdoilla ja massoilla. Sähköaseman ulkoseinän läpiviennit on tiivistetty kosteuden läpipääsyn estämiseksi.

Polyuretaanivaahdo ei ole vesitiivis, joten kosteuden vuoksi haastavissa paikoissa käytetäänkin vesitiiviitä massoja polyuretaanin sijaan. Tiivistyksen kannalta haastavin on AHXAMK-W-kaapelin kierteinen keskusköysi, jota pitkin kosteus pääsee helpommin läpiviennin läpi, ellei tiivistys ole onnistunut juuri halutulla tavalla. Keskusköyden aiheuttama tiiveysongelma on joidenkin läpivientien kohdalla ratkaistu katkaisemalla keskusköysi ja tuomalla se kuparitangon tai kiskon avulla seinän läpi. [21; 24.]



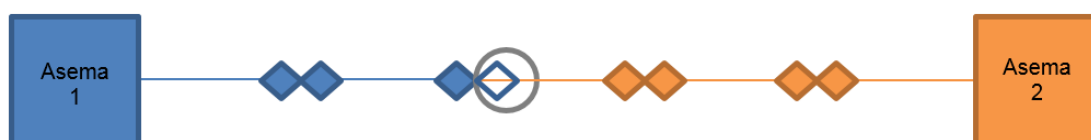
Kuva 11. Palokatkomassalla tiivistetyt AHXAMK-W-kaapeliläpiviennit [25]

Kaapelireitit

Ensimmäisen muuntamovälin kaapelireitit ovat hyvin monimuotoisia. Kaapelit voivat kulkea vierekkäin, päällekkäin tai siististi putkitettuna hieman irti toisistaan. Reitillä voi kulkea risteävää tai rinnan olevaa kaukolämpöverkkoa, mikä mahdollisesti lämmittää lähellä sijaitsevia keskijännitekaapeleita. Paikoittain kaapelireittien yläpuolella maanpinnan rajassa on myös katulämmitystä, jolla voi olla vaikutusta kaapeleiden lämpenemiseen talviaikaan. Maaperä ei ole homogeenistä kaapelireittien varrella, mikä aiheuttaa epätaisaista kuormittumista kaapeleissa. Muuttujia on siis monia ja näiden kaikkien tarkka huomioiminen kuormitettavuutta mietittäessä on mahdotonta nykyisiä menetelmiä käyttäen. Sähköasemalähtöjä voitaisiin toki tarkastella yksitellen ja luoda tätä kautta tapauskohtaisia kuormitusrajoja. HSV:n keskijänniteverkossa on tällä hetkellä käytössä hieman alle 600 keskijännitelähtöä, joten sähköasemalähtökohtaisten kuormitettavuuksien tarkastelu olisi projektina melko laaja. Tästä syystä keskitytään tämän työn osalta yleisten HSV:n keskijänniteverkon kattavien kuormitettavuusrajojen määrittämiseen, joita voidaan jatkossa muokata tilannekohtaisesti.

5.3 Poikkeuskytkentätilanteet

Keskijänniteverkon topologia suunnitellaan tarkasti ennen verkon rakentamista. Kuormitusta eri sähköasemien ja asemalähtöjen välillä pyritään tasoittamaan määrättyjen jakorajapaikkojen avulla. Jakorajaa käytetään esimerkiksi tilanteessa, jossa vasta-asemilla on yhteinen syötettävä reitti, ja syöttöpiirin kuormat halutaan jakaa näiden asemien kesken tasaisesti (kuva 12). Kuvassa salmiakkikuviot esittävät muuntamoiden keskijännitekojeistojen kuormaerottimia, ja ympyrä merkittyä jakorajapaikkaa.



Kuva 12. Sähköasemien välinen jakoraja

Todellisuudessa keskijänniteverkon kytkentätilanne muuttuu jatkuvasti, eikä usein vastaa kokonaisuudessaan verkon suunniteltua kytkentätilaa. Jakorajapaikkoja siirretään suunniteltujen kytkentöjen ja vikakeskeytysten yhteydessä. Suunnitellut kytkennät voivat

olla esimerkiksi verkonhaltijalta tilattuja kuluttajamuuntamokeskeytyksiä asiakkaan omien kojeistojen huoltotöiden ajaksi, tai verkonhaltijan omia suunniteltuja keskeytyksiä esimerkiksi sähköverkon saneeraus- tai uusinvestointitöiden ja sähköverkon huolto ja kunnossapitotöiden ajaksi. Keskijänniteverkon suunnitellut kytkennät muuntamoihin liittyvissä töissä eivät pääsääntöisesti aiheuta jakelukeskeytyksiä asiakkaille, sillä myös pienjänniteverkko on Helsingin alueella rakenteeltaan silmukoitu ja jakelu voidaan siirtää lähes aina toisen muuntopiirin muuntajan perään. Keskijänniteverkon suunniteltuja keskeytyksiä on HSV:n verkossa noin 510 kpl vuodessa. Tämä tarkoittaa jatkuvia topologia-muutoksia verkon kytkentätilanteessa.

Vikakeskeytyksiä voi syntyä kaapeli- ja pääteaurioista, muuntajaurioista, kojeistovi- oista sekä sähköasemälähdöissä olevien releiden virheellisestä toiminnasta. Keskijänniteverkon oikosulkuvikojen seurauksena syntyy aina jakelukeskeytyksiä. Häiriöiden määrää ei saada vähennettyä verkon silmukoidulla rakenteella. Silmukoidulla rakenteella saadaan kuitenkin vähennettyä jakelukeskeytysten määrää esimerkiksi verkon maasul- kutilanteen kytkentöjen osalta. Myös asiakkaiden kokemia keytysaikoja saadaan lyhy- emmiksi tehokkaan vikapaikan erotuksen johdosta. Usein keskeytys syntyy suurivirtai- sen maasulun tai oikosulun seurauksena, jolloin sähköasemalla sijaitsevat katkaisijat erottavat vikaantuneen lähdön verkosta releiden käskystä. Tämän jälkeen vikaantunut kaapeliväli voidaan paikantaa vikaindikaattoreiden avulla ja vikaantunut väli erottaa ja- korajan paikkaa siirtäen. Vikaantuneen välin paikannuksen ja erottamisen jälkeen joko- rajat jätetään kyseisille paikoilleen korjaustöiden ajaksi. Vuonna 2015 keskeytyksen ai- heuttaneita keskijänniteverkon vikoja oli 31 kpl. [9.]

Sähköaseman korvaaminen

Kuormituksen kannalta yksittäisistä kaapeli- tai muuntamovioista aiheutuvat kytkentä- muutokset eivät aiheuta ongelmia, sillä verkko on mitoitetu kestämään kyseiset tilanteet ongelmitta. Haastavia tilanteita kaapeleiden kuormitettavuuden kannalta voivat olla ko- konaisten sähköasemien keskeytykset, joiden aikana keskeytyksessä olevan sähköase- man kuormat siirretään keskijänniteverkon kautta muiden asemien syötön piiriin. Tavoit- teena on, että HSV:n verkossa yksittäisen sähköasemakeskeytyksen, mukaan lukien aseman kiskoston, korvauskytkennät voitaisiin tehdä ilman keskijänniteverkon ylikuormi- tustilanteita.

Sähköasemakeskeytyksestä esimerkkinä seuraava 08.12.2009 HSV:n verkossa tapahtunut sähköasemakeskeytys. Sähköasema oli normaalissa käyttötilassa, eli päämuuntaja 1 syötti a-kiskoa ja päämuuntaja 2 syötti b-kiskoa. Päämuuntaja 1:n muuntajasuoja irrotti muuntajan verkosta päämuuntajan keskijännitepuolen alumiinikiskoilla tapahtuneen oikosulun seurauksena, jolloin 7190 asiakkaalle aiheutui jakelukeskeytys. Muuntajan päällystämättömien kiskosiltojen oikosulun aiheutti päämuuntajakennoon päässyt orava kiskosillalla kulkiessaan. Jos toinen muuntaja olisi ollut vianaikana pois käytöstä, olisi syntynyt koko sähköaseman kattava keskeytys. Tällöin jakelukeskeytyksen piirissä olisi ollut noin 26 000 asiakasta. [26.]

HSV:ssä tehdään sähköasemakohtaiset korvaussuunnitelmat jokaista työtä kohtaan, joissa puolen sähköaseman tai toisen päämuuntajan käyttöönotto kestää yli kolmetuntia esimerkiksi aseman toisen päämuuntajan mahdollisen vian alkaessa. Jos tehtävä päämuuntajahuolto voidaan keskeyttää ja muuntaja käyttöönottaa alle 3 tunnissa vian alkamisesta, ei korvaussuunnitelmaa tarvitse tehdä.

Jokaiselle sähköasemalle on tehty yksilölliset korvaussuunnitelmat. Korvaussuunnitelma käsittelee sähköaseman korvausta tilanteessa, jossa mikään aseman päämuuntajista ei ole käytettävissä. Tällaisessa tilanteessa aseman kuormat täytyy siirtää vasta-asemien syöttäviksi. Sähköaseman korvaustilanteeseen voidaan joutua esimerkiksi toisen päämuuntajan huollon aikana tapahtuvan käytössä olevan päämuuntajan vioittumisen seurauksena.

Korvaussuunnitelmassa on käsitelty kuormien siirtämiseen liittyvät toimenpiteet yksityiskohtaisesti kytkentävaihe kerrallaan. Suunnitelmaa apuna käyttäen vastaava käyttömes-tari ohjaa tarvittavat kytkennät sähköaseman korvaamiseksi. Sähköaseman kuormista osa siirretään suoraan muiden asemien syöttäviksi verkolla tehtävin kytkennöin. Korvattavan sähköaseman kiskoja voidaan syöttää vasta-aseman kautta, jolloin kiskojen kautta saadaan syötettyä osaa sähköaseman kuormista. Tämä nopeuttaa ja yksinkertaistaa verkolla tehtävien kytkentöjen suorittamista vähentäen jakelumuuntamoilla tehtävien kytkentöjen määrää.

Korvaussuunnitelmaan on liitetty kytkentäkaavio, josta nähdään tarkasti ne kohteet, joi-hin kytkentätoimenpiteet kohdistuu. Kaavioon on myös laitettu korvaustilanteen aikaiset

päämuuntajien ja keskijännitekaapeleiden arvioidut kuormitusvirrat. *Taulukosta 5* nähdään nykyisistä korvaussuunnitelmista katsotut korvaustilanteen aikaisten suurimpien kuormitusvirtojen arvioidut arvot sähköasemittain. [27.]

Taulukko 5. Korvauskytkentöjen aikaiset suurimmat sähköasemälähtökohtaiset kuormitusvirrat

Korvattavat sähköasemat			
20 kV	(A)	10 kV	(A)
Pasila	246	Kamppi	277
Tapanila	244	Meilahti	273
Suurmetsä	230	Kruunuhaka	270
Ilmalantori	226	Kluuvi	258
Pukinmäki	226	Töölö	252
Vuosaari	220	Salmisaari	247
Kannelmäki	211	Vallila	247
Myllypuro	209	Punavuori	238
Pitäjänmäki Pohjoinen	207	Kasarmitori	235
Pitäjänmäki Etelä	199	Lauttasaari	220
Herttoniemi	195	Suvilahti	191
Viikinmäki	195		
Laajasalo	147		

Suurin arvioitu kuormitusvirta (277 A) on nykyisten korvaussuunnitelmien mukaan Kampin sähköaseman korvauksen yhteydessä, osaa Kampin aseman kuormista syöttävän Töölön sähköaseman yhdellä lähdöllä. Työssä käytettyjen korvauskytkentäsuunnitelmien ja käytössä olevien kuormitettavuusrajojen (*taulukko 3*) mukaan ylikuormitustilanteeseen jouduttaisiin kesäisin Pasilan, Tapanilan ja Kampin sähköasemien korvaustilanteissa.

6 Kaapeleiden jatkuva kuormitettavuus

6.1 SFS 5636

Kaapeleiden jatkuvan kuormitettavuuden mallintamismenetelmät ovat pääasiassa teoreettisia. Tässä työssä kuormitettavuuden mallintaminen tehdään CENELEC-harmonisointiasiakirjaan HD 620 10F -pohjautuvan SFS 5636 -standardin mukaisella menetelmällä, joka on Suomessa yleisimmin käytetty tapa keskijännitekaapeleiden kuormitetta-

vuuden määrittämiseen. Standardin ilmoittamat kuormitettavuusarvot ja korjauskertoimet vastaavat lähes poikkeuksetta kaapelivalmistajien ilmoittamia jatkuvan kuormitettavuuden mitoitusarvoja. Vaihtoehtoisesti kuormitettavuutta voitaisiin määrittää myös tarkemmilla laskennallisilla menetelmillä, mutta keskiännitemaakaapeloinnin yhteydessä erot näiden menetelmien välillä ovat hyvin pieniä. [13.]

Standardissa maa-asennuksissa jatkuvassa kuormituksessa olevan PEX-eristeisen kaapelin oletusolosuhteet ovat: maaperän lämpötila +15 °C, johtimen lämpötila +65 °C, maan lämpöresistiivisyys 1,0 Km/W ja asennussyvyys 0,7 m. Maanpinnan yläpuolisissa asennuksissa jatkuvassa kuormituksessa olevan PEX-eristeisen kaapelin oletusolosuhteet ovat: ilman lämpötila +25 °C ja johtimen lämpötila +90 °C. Standardi olettaa myös tuulen nopeudeksi 0,6 m/s ja auringon säteilyksi 1000 W/m, mitä ei tarvitse ottaa huomioon maakaapeliverkon kuormitettavuutta määrittäessä. Oletusolosuhteiden mukaiset kuormitettavuusrajat saadaan *taulukosta 6*.

Taulukko 6. AHXAMK-W-kaapeleille annettuja kuormitettavuuden raja-arvoja oletusolosuhteissa [15]

Nimellinen poikki-pinta-ala (mm ²)	Maa-asennus +15 °C				Ilma-asennus +25 °C			
	Johtimen lämpötila +65 °C				Johtimen lämpötila +90 °C			
	Taso		Kolmio		Taso		Kolmio	
	Kosketussuojapiiri		Kosketussuojapiiri		Kosketussuojapiiri		Kosketussuojapiiri	
	Avoin (A)	Suljettu (A)	Avoin (A)	Suljettu (A)	Avoin (A)	Suljettu (A)	Avoin (A)	Suljettu (A)
240	435	395	395	385	570	515	505	490
300	485	440	445	435	650	580	580	565

Todellisuudessa kaapeleiden asennusolosuhteet poikkeavat usein standardin mukaisista oletuksista. Poikkeavan asennustavan kuormitettavuusrajoja korjataan korjauskertoimien avulla. Tällaisia poikkeavia tilanteita aiheuttaa muun muassa ympäristön lämpötilan ja lämpöresistiivisyyden vaihtelut sekä vierekkäisten johtimien toisiaan lämmittävä vaikutus. Asennustavoista johtuvien erilaisten asennusympäristöjen korjauskertoimia nähdään *taulukoista 7-14*. Yhteenveto laskuissa käytetyistä standardin taulukoista löytyy *liitteestä 2*.

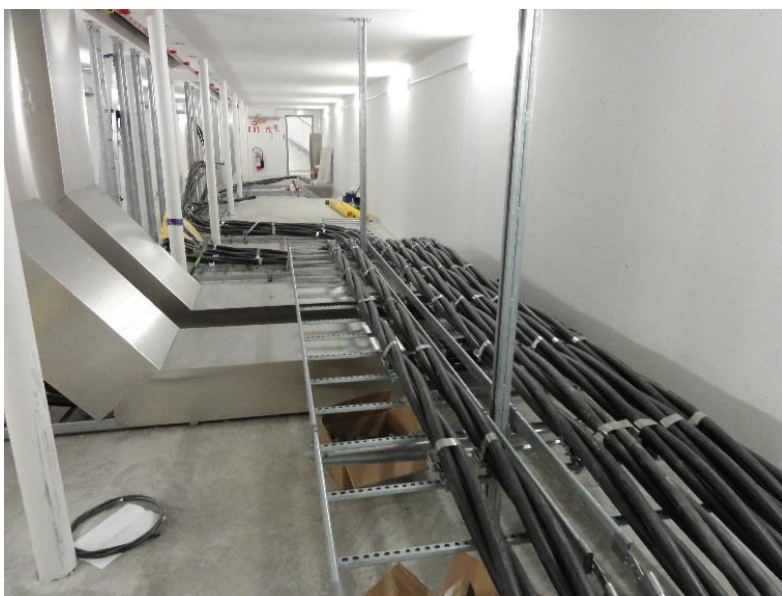
6.2 Jatkuva kuormitettavuus eri asennusolosuhteissa

Tarkastellaan SFS 5636 -standardin mukaisesti kaapeleiden jatkuvaa kuormitettavuutta erilaisissa asennusolosuhteissa kuormitettavuuden kannalta heikoimman kohdan löytämiseksi. Keskitytään kaapeleiden kuormitettavuuteen kaapelikellareissa, läpivienneissä, muuntamotiloissa, maa-asennuksissa sekä putkitetuissa maa-asennuksissa. Standardissa puhutaan monijohdinkaapeleista ja yksijohdinkaapeleista. AHXAMK-W-kaapelin kohdalla voidaan käyttää ryhmässä olevien kolmioon asennettujen yksijohdinkaapeleiden taulukkoarvoja. HSV:n keskijänniteverkossa kaapeleiden kosketussuojat ovat yhdistetty toisiinsa ja maadoitettu molemmista päistään, eli ns. suljettu kosketussuojapiiri.

Seuraavat laskelmat kappaleissa 6.2.1-4 ovat esimerkkitapauksia kaapeleiden kuormitettavuudesta erilaisissa olosuhteissa. Todellisuudessa kuormitettavuudet vaihtelevat paljon kaapelireittien muuttuvien ympäristöjen johdosta. [15.]

6.2.1 Kaapelikellariin asennetut kaapelit

Kaapelikellariin asennetut kaapelit kulkevat usein siististi vierekkäin alumiinitikkaille tai betonilattialle aseteltuina. Kaapelikellariasennuksesta esimerkkinä Ilmalantorin sähköaseman kaapelikellari (kuva 13). Usein kaapelit kulkevat kuitenkin toisissaan kiinni tai päällekkäin, jolloin suurin lämpeneminen tapahtuu näissä kohdissa.



Kuva 13. Ilmalantorin sähköaseman kaapelikellari rakennusvaiheessa [25]

Tarkastellaan AXW240-kaapelin kuormitettavuutta kaapelikellarissa. Otetaan ilmaan asennetun kaapelin kuormitettavuuden arvo oletustilanteessa *taulukosta 6*. AXW240-kaapelille suljetulla kosketussuojapiirillä saadaan arvo 490 A. Ilma-asennetun kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttaa ympäröivän ilman lämpötila, jonka kuormituskerroin saadaan *taulukosta 7*.

Taulukko 7. Korjauskertoimet ilman lämpötilan vaikutukselle kuormitettavuuteen [15]

Johtimen sallittulämpötila [°C]	Ilman lämpötila [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
90	1,12	1,08	1,04	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,74	0,68
80	1,14	1,09	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,77	0,69	0,61
70	1,18	1,12	1,06	1	0,93	0,86	0,79	0,71	0,62	0,52
65	1,2	1,14	1,07	1	0,93	0,85	0,77	0,68	0,57	0,45

Kaapelikellarissa olevien kaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttaa vierekkäisten täydessä kuormassa olevien kaapeleiden lukumäärä ja niiden etäisyys ympäröivistä seinistä. Nämä korjauskertoimet saadaan *taulukosta 8*.

Taulukko 8. Korjauskertoimet AHXAMK-W-kaapeliryhmille ilma-asennuksissa [15]

Asennustapa		Kaapelit kiinni toisissaan Kaapelit kiinni seinässä, lattiassa tai katossa				
Kaapelien lukumäärä		1	2	3	6	9
Lattialla		Korjauskerroin				
		0,9	0,84	0,8	0,75	0,73
Kaapelitikkailla	Tikkaiden lukumäärä					
	1	0,95	0,84	0,8	0,75	0,73
	2	0,95	0,8	0,76	0,71	0,69
	3	0,95	0,78	0,74	0,7	0,68
	6	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66
Seinällä		0,95	0,78	0,73	0,68	0,66

Lopullisen kuormitettavuuden määrittämiseksi kerrotaan oletusolosuhteissa oleva kuormitettavuus halutuilla korjauskertoimilla. Esimerkkinä kuormitettavuus tilanteessa, missä ympäristön lämpötila on +40 °C, ja 2 lattialle asennettua toisissaan kiinni olevaa kaapelia ovat yhtäaikaaisesti täydessä kuormassa.

$$I_{max} = 490 \text{ A} * 0,85 * 0,84 = 350 \text{ A}$$

6.2.2 Muuntamoihin asennetut kaapelit

Muuntamo on varustettu keskijännitekojeistoilla, joihin kaapelit liittyvät. Kaapelit kulkevat siis osin muuntamon sisällä, jolloin kuormitettavuutta voidaan tarkastella kaapelikellarin mitoituksessa (6.2.1) käytettyjen taulukoiden pohjalta. Merkittävin ero kaapelikellarin ympäristöön verrattuna on muuntamotilan lämpötila. Muuntamon lämpötila on usein korkeampi kuin kaapelikellarin, johtuen muuntamossa sijaitsevien jakelumuuntajien lämmittävästä vaikutuksesta. Riippuen muuntamon ilmanvaihto järjestelyistä, jakelumuuntajien määrästä ja niiden kuormituksesta, voi muuntamon sisätilan lämpötila nousta kesäisin jopa +60 °C. Muuntamoissa tosin kuormitettavien keskijännitekaapeleiden määrä on pienempi kuin sähköaseman päässä. [22.]

Tarkastellaan tilannetta, jossa suljetulla kosketussuojapiirillä varustettu AXW240 kaapeli on sijoitettu muuntamon lattialle, muuntamon sisälämpötila on +55 °C, ja vain yksi keskijännitekaapeli on täydessä kuormassa. Kuormitettavuus oletusolosuhteissa on *taulukon 6* mukaan 490 A, ja korjauskertoimet saadaan *taulukoista 7 ja 8*.

$$I_{max} = 490 \text{ A} * 0,68 * 0,90 = 300 \text{ A}$$

6.2.3 Maahan asennetut kaapelit

Kun kaapelit on tuotu ulkoseinän läpivientien kautta pihalle, ne jakautuvat eri suuntiin syöttämiään muuntamoita kohti. Kaapelit putkitetaan usein vasta ensimmäisen taivutuksen jälkeen, suoran vedon alkaessa. Tarkastellaan kuormitettavuutta suoraan maahan asennetun kaapelin osalta.

Kuormitusvirraksi maahan asennetulle AXW240-kaapelille, jonka kosketussuoja on HSV:n verkossa kaapelin molemmista päistä maadoitettu, saadaan 385 A *taulukosta 6*. Tätä kuormitusvirran arvoa muokataan sen asennusympäristön ja -tavan mukaisilla korjauskertoimilla. Ensimmäisenä otetaan huomioon suoraan maahan asennuksen vaikutus kuormitettavuuteen *taulukko 9*.

Taulukko 9. Korjauskertoimet AHXAMK-W-kaapeliryhmien vaikutukselle maa-asennuksessa [15]

Monijohdinkaa- peleiden väli- nen etäisyys mm	Vierekkäisten AHXAMK-W-kaapeleiden lukumäärä						
	2	3	4	5	6	8	10
0	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
70	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
250	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

Keskijänniteverkon kohdalla voidaan olettaa korkeintaan kahden vierekkäisen sähköasemälähdön kaapeleiden olevan täydessä kuormassa yhtäaikaaisesti [19, s. 6.]. Kaapelit voivat olla kosketuksissa toisiinsa esimerkiksi risteyskohdissa, joten käytetään toisisaahan kiinniolevien kaapeleiden korjauskertoimia. Näiden oletusten pohjalta voidaan valita korjauskertoimeksi 0,79.

Seuraavaksi määritetään korjauskerroin kaapelin asennussyvyyden vaikutuksesta kuormitettavuuteen *taulukosta 10*.

Taulukko 10. Korjauskertoimet 6-30 kV kaapeleiden asennussyvyyden vaikutukselle maa-asennuksessa [15]

Asennussyvyys	0,50-0,70	0,71-0,90	0,91-1,10	1,11-1,30	1,31-1,50
korjauskerroin	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95

Kaapelinasennussyvyys voi olla paikoittain jopa 1,5 m. Otetaan siis asennussyvyyden mukaan huonointa tilannetta vastaava korjauskerroin 0,95.

Maaperän lämpöresistiivisyyden korjauskertoimet saadaan *taulukosta 11*.

Taulukko 11. Korjauskertoimet eri maaperän lämpöresistiivisyyksien vaikutukselle maa-asennuksessa [15]

Maaperän lämpöresis- tiivisyys [Km/W]	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3
korjauskerroin	1,10	1,00	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63

Kaapelikaivannot täytetään kaapelihiekalla tai soralla, joten käytetään maa-aineksen lämpöresistiivisyyden arvona puolikuivan soran ja hiekan lämpöresistiivisyysarvoa 1,2 Km/W. Korjauskertoimeksi saadaan 0,92.

Viimeisenä muuttujana SFS 5636:ssa otetaan huomioon maaperän lämpötila, mikä muuttuu Suomessa vuodenaikojen mukaan (*taulukko 12*).

Taulukko 12. Korjauskertoimet maaperän lämpötilan vaikutukselle [15]

Johtimen sallittu lämpötila (°C)	Maaperän lämpötila (°C)										
	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,13	1,10	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,82	0,77
80	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73
70	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,73	0,67
65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63

Oletetaan kesällä maaperän lämpötilaksi +15 °C ja talvella lumikerroksen alla olevan maaperän lämpötilaksi +10 °C. Vähälumisena talvena maaperän lämpötila laskee alhaisemmaksi kuin lumikerroksen alla olevan maaperän lämpötila. Kuormitettavuuden kannalta epäedullisin tilanne on kuitenkin lumen peittämä maa. Maahan asennetun kaapelin suurimman sallitun käyttölämpötilan ollessa +65 °C, saadaan korjauskertoimiksi kesällä 1 ja talvella 1,05.

Näiden saatujen kuormituskertoimien avulla voidaan laskea sallitut talven ja kesän kuormitusvirranarvot suoraan maahan asennettujen AXW240-kaapeliosuuksien kohdalle seuraavasti:

$$I_{max}(kesä) = 485 A * 0,79 * 0,95 * 0,92 * 1,00 = 266 A$$

$$I_{max}(talvi) = 385 A * 0,79 * 0,95 * 0,92 * 1,05 = 279 A$$

6.2.4 Putkitetut maahan asennetut kaapelit

Keskijännitekaapelit pyritään Helsingin alueella asentamaan putkiin, koska se parantaa kaapelin mekaanista suojausta ja helpottaa tulevia kaapelin vaihtoja sekä vikakorjauksia. Helsingin keskustassa on runsaasti putkitettuja teiden alituksia, joiden matkalta kaapelit ovat tarvittaessa helposti uusittavissa tien molemmin puolin tehtävien kaivantojen kautta.

Vastaavasti kuin edellisessä luvussa määritettiin kuormitettavuusarvoja maahan asennetuille kaapeleille, voidaan määrittää kuormitettavuusarvot maahan asennetuissa putkissa oleville AXW240-kaapeleillekin. Oletustilanteen kuormitusarvo on siis edelleen 385 A, mutta putkitettujen kaapeleiden maa-asennukset huomioon ottaen käytetään korjauskertoimia *taulukosta 13*.

Taulukko 13. Korjauskertoimet putkeen asennettujen AHXAMK-W-kaapeliryhmien vaikutukselle maa-asennuksessa [15]

Putkitettujen monijohdin-kaapeleiden välinen etäisyys mm	Vierekkäisten putkitettujen AHXAMK-W-kaapeleiden lukumäärä							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0,80	0,75	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50
70		0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55
250		0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65

Käytetään vastaavia oletuksia kuin suoraan maahan asennetun kaapelin yhteydessä, jotta kuormitettavuuksien vertailu onnistuisi. Eli kahden toisissaan kiinni olevien putkitettujen kaapeleiden korjauskerroin on 0,75.

Muut korjauskertoimet saadaan *taulukoista 10, 11 ja 12*. Lasketaan putkitetun kaapelin kuormitettavuus, kun asennussyvyys on 1,5 m; maaperän lämpöresistiivisyys on 1,2 Km/W; maaperän lämpötila on kesällä +15 °C ja talvella +10 °C.

$$I_{\max}(\text{kesä}) = 385 \text{ A} * 0,75 * 0,95 * 0,92 * 1,00 = 252 \text{ A}$$

$$I_{\max}(\text{talvi}) = 385 \text{ A} * 0,75 * 0,95 * 0,92 * 1,05 = 265 \text{ A}$$

6.2.5 Kaapeliläpiviennit

Kuormitettavuuden aleneminen läpivienneissä on voimakkaasti riippuvainen muun muassa johdinmateriaalista, vaihejohtimien lukumäärästä, johtimen poikkipinta-alasta, kosketussuojan tyypistä ja koosta sekä läpiviennin tiivistykseen käytetyn aineen lämpöresistiivisyydestä. Johtimen metalli toimii hyvänä lämmönjohtimena riippuen sen poikkipinta-alasta. Mitä paksumpi johdin kaapelissa on, sitä paremmin se siirtää häviöiden tuottamaa lämpöä kaapelin pituussuunnassa läpiviennin ulkopuolelle.

Kaapeleiden kuormitettavuuteen läpivienneissä ei ole määritetty mitään yleispäteviä korjauskertoimia, vaan ne on laskettava tapauskohtaisesti. *Taulukon 14* korjauskertoimet on määritetty Prysmian Finland Oy:n toimesta AHXAMK-W 3x240+70 20 kV:n kaapelille polyuretaaniläpiviennissä, kun polyuretaanin lämpöresistiivisyys on 45 Km/W. Tarkemmat laskentatiedot löytyvät *liitteestä 1*.

Taulukko 14. AHXAMK-W 3x240+75 20 kV -kaapelin kuormitettavuus polyuretaaniläpiviennissä [Liite 1]

Läpiviennin paksuus mm	Kuormitettavuus (A)	Korjauskerroin
50	373	0,969
100	361	0,939
150	350	0,910
200	339	0,882
300	329	0,830
400	320	0,783
500	301	0,740
600	285	0,701
700	270	0,665
800	256	0,633
900	244	0,604
1000	233	0,577
1200	222	0,530

Tuloksista nähdään, kuinka paljon läpiviennin paksuus vaikuttaa kaapelin kuormitettavuuteen. Läpivientejä polyuretaanilla tiivistettäessä onkin syytä miettiä, kuinka pitkälle matkalle läpivientä tiiviste laitetaan. Keskijännitekaapeleiden läpivientien kohdalla on tuskin tarpeellista käyttää polyuretaania koko läpiviennin paksuudelta, jolloin läpivientien kuormitettavuuden laskemisen ei pitäisi olla kaapeleiden kuormitettavuuden määrittävä

tekijä. HSV:n verkon keskijännitekaapeleiden läpiviennit ovat paksuudeltaan suurimmillaan noin 0,5 m:n mittaisia. Kaapelin suurin kuormitettavuus on siis näiden laskelmien pohjalta 301 A kuormitettavuuden kannalta heikoimmassa tilanteessa, joka edellyttää koko 0,5 metrin matkalta tiivistettyä läpivientä. Kaapelin jatkuva kuormitettavuus on todellisuudessa hieman suurempi, sillä lasketut kuormitettavuuden arvot ovat mitattuja arvoja pienemmät ja polyuretaanin lämpöresistiivisyys vaihtelee tuotteesta riippuen 33 - 45 Km/W välillä. [28; 29.]

6.3 Kuormitettavuuksien vertailu

Saaduista tuloksista voidaan rajata kaapelikellarit, muuntamotilat ja läpiviennit pois kuormitettavuuden mitoituksista, sillä HSV:n keskijänniteverkon vaativimmissakin tilanteissa ilma-asennettujen kaapeleiden kuormitettavuus pysyy suurempana kuin esimerkiksi maan alle putkeen asennettujen kaapeleiden kuormitettavuus ja läpivientien kuormitettavuus on selvästi maa-asennuksia korkeampi lyhyiden läpivientien osalta.

Tarkastellaan putkitettujen ja suoraan maahan asennettujen kaapeleiden kuormitettavuuseroja (taulukko 15).

Taulukko 15. Jatkuvan kuormitusvirran raja-arvot AXW240-kaapelille esimerkkitapauksissa

	Maa-asennus	
	Suoraan (A)	Putkeen (A)
Kesä	266	252
Talvi	279	265

Tuloksista nähdään, että kuormituksen kannalta heikoin kohta keskijänniteverkon kaapeloinnissa on SFS 5636 -standardin mukaan määritettynä maahan upotettuun putkeen asennettu kaapeli. Tarkempia kuormitettavuusarvoja määritettäessä voidaan siis keskittyä kyseiseen asennustapaan.

7 Kuormitettavuusrajat

7.1 Kuormitettavuusrajat Suomessa

HSV:n kuormitettavuusrajat ovat olleet käytössä jo hyvin pitkään, eikä niiden päivitystä nykytilanteeseen ole vielä tehty. Perusteet käytössä oleville kuormitettavuusrajoille ovat hyvin hatarat, sillä dokumentteja aikaisempien rajojen määrittämisestä ei ole säilynyt. AHXAMK-W-kaapeleihin siirtymisen seurauksena rajojen tarkastelu on tullut ajankoh- taiseksi, sillä uuden kaapelityypin paremman kuormitettavuuden seurauksena myös kes- kijänniteverkon kuormitettavuus on kasvanut olennaisesti. Suoritin kyselyn keskijännite- verkon kuormitettavuuteen liittyen muutamille kaupunkiverkkoa hallinnoiville suomalai- sille verkkoyhtiöille. Kyselyyn vastasi työni valmistumisen aikana Tampereen Sähkö- verkko Oy, JE-Siirto Oy, Pori Energia Sähköverkot Oy sekä Vantaan Energia Sähköver- kot Oy.

Kyselyn tuloksena voidaan todeta kuormitettavuusrajojen mitoituksen eroavan eri verk- koyhtiöiden välillä huomattavasti, mikä johtuu osittain verkkojen rakenteellisesta erilai- suudesta kaupunkien välillä. Yleisimmin käytetyt mitoitusperusteet olivat kaapelivalmis- tajien antamat kuormitettavuusrajat ja korjauskertoimet. Mitoituksia oli tehty myös SFS 6000 -standardin mukaisten korjauskertoimien sekä Senerin verkostosuosittelun perus- teella. Kaapelivalmistajien antamat kuormitettavuustaulukot ja SFS 6000 -standardissa ilmoitetut korjauskertoimet ovat lähes yhtäläisiä SFS 5636 -standardin mitoitusarvojen kanssa. Suurimmat kuormitettavuusrajojen erot syntyivät korjauskertoimien erilaisesta soveltamisesta tai soveltamatta jättämisestä.

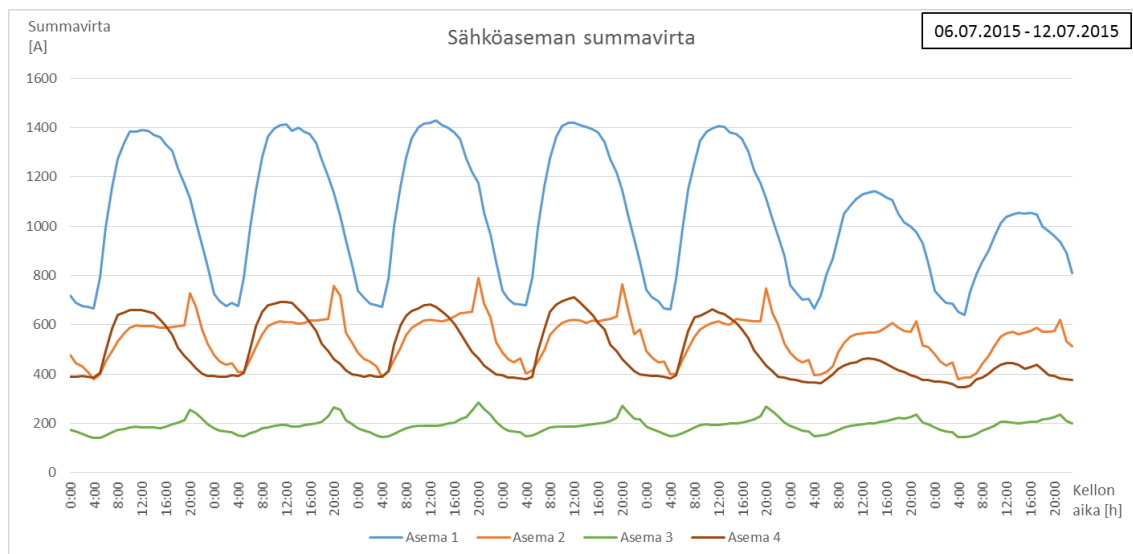
Eroja on myös kuormitettavuusrajojen vaikutusalueissa. Rajoja on määritetty eri verkko- yhtiöillä muun muassa yleisesti koko keskijänniteverkolle, sähköasemakohtaisesti tai sähköasemalähtökohtaisesti. Yksittäisten lähtöjen perusteella tehdyt mitoitukset ovat tarkempia kuin yleiset rajat, sillä näin verkon kaapeloinnin eroavaisuudet saadaan huo- mioitua paremmin. Toisaalta verkon ollessa tasaisesti samalla kaapelityypillä kaapeloitu, ei sähköasemalähtökohtaiseen tarkasteluun ole syytä ryhtyä. Jokaisella vastanneella verkkoyhtiöllä asetetut kuormitettavuusrajat ovat hälyttäviä käytönvalvontajärjestel- mässä, mutta hälytystavoissa on eroja. Hälytyksiä on aseteltu yhdessä ja kahdessa por- taassa toimiviksi. Yhden portaalan hälytysrajassa järjestelmä hälyttää rajan ylittyessä, jol- loin verkon valvomoon tulevaan hälytykseen voidaan reagoida sen vaatimalla tavalla.

Kahden portaan hälytyksessä järjestelmä havahtuu jo kuormitusvirran noustessa lähelle kuormitettavuusrajaa, ja rajan ylittyessä hälytyksen prioriteettitaso nousee.

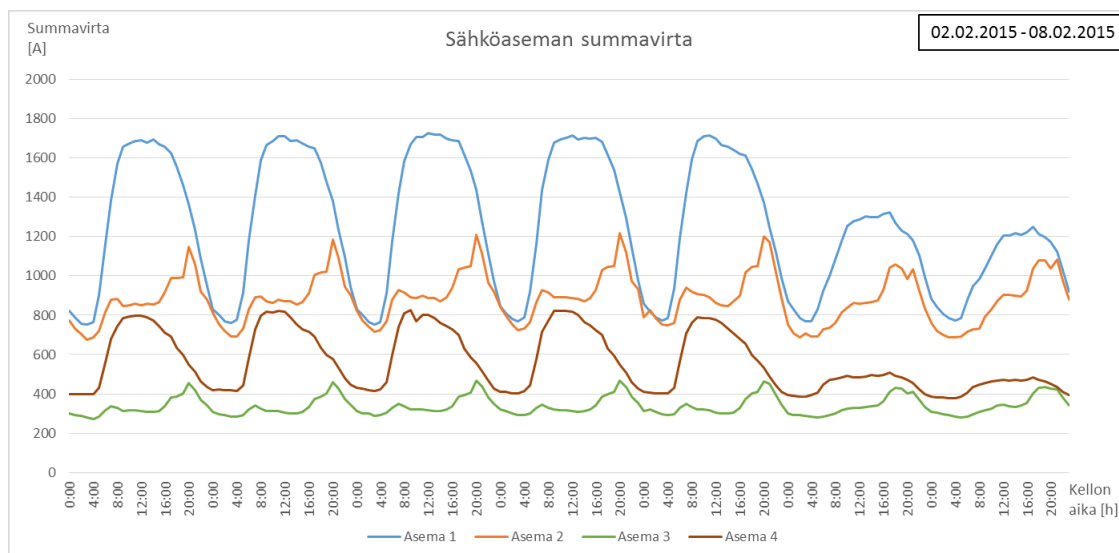
Jotkut verkkoyhtiöistä käyttävät samoja kuormitettavuusrajoja ympäri vuoden, kun toiset määrittävät erilliset rajat kesä- ja talvikausille lämpötilaerojen johdosta. Tässä yhtenä tekijänä varmasti se, ettei kaikilla verkoilla ole tarvetta rajojen nostamiseen talven ajaksi. Jos rajat voidaan mitoittaa kesälämpötilojen mukaisiksi, niin vältetään turhalta rajojen vaihtelulta, mikä taas yksinkertaistaa verkon suunnittelua sekä korvaussuunnitelmien laatimista. Yhtenä tiedustelun kohteena oli läpivientien kuormitettavuutta alentavan vaikutuksen huomioiminen. Kaikissa verkkoyhtiöissä läpivientien vaikutusta ei ole huomioitu kuormitettavuuden mitoituksessa, sillä vaikutuksen uskotaan olevan hyvin pieni. Toisinaan läpivientien lämmönjohtokykyä on parannettu joissain verkkoyhtiöissä kieltämällä polyuretaanin käyttö läpivientien tiivistyksessä, ja korvaamalla se paremmin lämpöä johtavilla materiaaleilla. Läpivientien asennustapoja on monia, ja ratkaisumallit vaihtelevat asennusvuosien mukaan. [20.]

7.2 Kuormitusvirran vuorokausivaihtelu

Keskijänniteverkon kuormitusvirta on muodoltaan vaihtelevaa, mikä johtuu sähkön kulutuksen ajoittaisesta vaihtelusta. *Luvussa 6* selvitettiin AHXAMK-W-kaapeleiden jatkuvaa kuormitettavuutta SFS 5636 -standardin pohjalta, mikä ei ota huomioon kuormituksen ajoittaista vaihtelua. Todellista kuormitettavuutta tarkastellessa täytyykin ottaa huomioon myös tämän vaihtelun kuormitettavuutta nostava vaikutus.



Kaavio 1. Sähkösäemien keskijännitepuolen summavirta kesäaikaan



Kaavio 2. Sähköasemien keskiännitepuolen summavirrat talviaikaan

Kaavioissa 1 ja 2 on kuvattu neljän Helsingissä olevan sähköaseman mitattuja keskiännitelähtöjen summavirtoja vuorokausittaisen kuormitusvaihtelun havainnollistamiseksi. Kiinteistöjen lämmitystarve kasvaa talviaikaan ulkolämpötilojen laskemisen seurauksena, mikä näkyy sähkön kulutuksen kasvuna summavirtakaavioissa. Sähkönkulutus on talviaikaan jopa 83 % kesäajan kulutusta suurempi. Kuvaajista nähdään selkeästi myös kuormituksen vuorokausittainen vaihtelu. Kuormitus laskee kaikilla esimerkiasemilla yön ajaksi huomattavasti päivän kuormitusta vähäisemmäksi, jopa 65 %. Tämä selittyy ihmisten sähkönkulutuksen vuorokausirytmillä.

Kaavioiden sähköasemilla on toisistaan eroavaa kuormitusta, mikä nähdään summavirtakuvaajien erilaisuutena. Kauppakeskusten ja muiden koko päivän toiminnassa olevien liikerakennusten sähkönkulutus näkyy päivän mittaan tasaisena kuormituksena aseman virroissa. Tästä esimerkkinä on aseman 1 summavirta. Asemien 2 ja 3 summavirrat muistuttavat toisiaan, sillä molemmissa kuormitusvirrat kasvavat illan ajaksi. Illalla nouseva kuormituskäyrä kertoo kyseisien asemien syöttöpiirissä olevista asuinkiinteistöistä, joiden sähkönkulutus ajoittuu iltoihin esimerkiksi ruuanlaiton ja saunomisen seurauksena.

Aseman 4 summavirtakäyrä kasvaa aamulla ja lähtee laskuun iltapäivän aikana, josta voidaan päätellä alueen kuormituksen koostuvan liiketiloista, joiden käyttö rajoittuu ky-

seiselle korkeamman kuormituksen aikavälille. Usein työpäivät päättyvät klo 16.00, jolloin kuormituskäyrä lähtee laskuun aseman 4 kohdalla. Kahden viimeisen vuorokauden aikana asemien kuormitettavuus on selvästi alhaisempi kuin muiden, lukuun ottamatta aseman 3 summavirtaa. Tämä ero selittyy viikonlopun aikaisella arkipäivien kulutusta alhaisemmalla sähkön kulutuksella. Kuvaajien ensimmäinen vuorokausi onkin maanantai ja viimeinen sunnuntai.

7.3 Kuormitettavuusrajojen määrittäminen

Kuormitettavuusrajat voidaan asettaa yleisesti koko HSV:n keskijänniteverkon alueelle tai esimerkiksi sähköasemakohtaisesti. Rajoja voitaisiin tarkastella myös yksittäisten sähköasemalähtöjen pohjalta, mikä tehostaisi verkon todellisen kapasiteetin hyödyntämistä ja helpottaisi erityyppisiä kaapeleita sisältävien verkonosien huomioimista kuormitettavuuden suunnittelussa. Tässä työssä määritetään arvot yleisille koko keskijänniteverkon kattaville kuormitettavuusrajoille AHXAMK-W-tyyppistä kaapelia sisältävien asemalähtöjen osalta.

Määritetään kuormitettavuusrajat kahdessa portaassa. Ensimmäinen raja asetetaan kaapelin peruskuormitettavuuden suurimpaan sallittuun arvoon, jonka ylittyessä ollaan hätäkuormitettavuusalueella. Toinen kuormitettavuusraja on hätäkuormitettavuuden suurin sallittu arvo, jonka ylittymistä kaapelin liian suuren lämpenemisen vuoksi ei suositella. Määritetään erilliset raja-arvot myös kesä- ja talvikausiksi lämpötilaerojen vuoksi.

SFS 5636 -standardin avulla voidaan määrittää PEX-eristeisen kaapelin jatkuvan kuormitettavuuden arvo. Keskijänniteverkon tapauksessa kuormitettavuus ei ole jatkuvaa vaan jaksottaista. Päivisin kaupunkiverkon kuormitus on suurempaa kuin öisin (*kaavio 1 ja 2*), joten päivällä lämmentyneet kaapelit jäähtyvät öisin vähentyneen kuormituksen ja ympäristön lämpötilan laskun seurauksena. Tämä johtaa siihen, ettei jatkuvan kuormitettavuuden arvoja käytetä suoraan keskijänniteverkossa, vaan myös kuormituksen ajoittainen vaihtelu tulee ottaa huomioon. Senerin verkostosuositus SA 5:94:n mukaan keskijänniteverkossa on yleisimmin käytetty korjauskertoimia 1,1 – 1,15 vuorokausivaihtelun huomioimiseksi.

Korjauskertoimet

Jatkuva kuormitettavuus voidaan määrittää *luvun 6.3* perusteella putkitettujen kaapeli-reittien mukaan, joten käytetään siihen soveltuvia korjauskertoimia lopullisten kuormitettavuusrajojen määrittämisessä.

Oletetaan, että vierekkäisistä kaapeleista korkeintaan kaksi on samanaikaisesti täydessä kuormassa. Todellisuudessa täydessä kuormassa olevat johtolähdöt ovat usein yksittäisiä, mutta mitoituseseen käytetään kuormitettavuuden kannalta heikompaa tilannetta. Täydessä kuormassa olevalle kahdelle kaapelille, jotka sijaitsevat vierekkäisissä toisissaan kiinni olevissa putkissa, saadaan korjauskertoimeksi 0,75 *taulukosta 13*.

Kaapeleiden asennussyvyys saattaa vaihdella suuresti paikasta riippuen. Paikoittain kaapelit voivat olla jopa 1,5 metrin syvyyteen asennettuna, joten määritetään rajat käyttäen *taulukon 10* antamaa 1,5 metrin syvyyteen asennetun kaapelin korjauskerrointa 0,95.

Maaperän lämpöresistiivisyys muuttuu sen kosteuden mukaan. Sateettomat kaudet, kaapelien kuormitus ja korkea ulkolämpötila yhdessä asfalttipäällysteen kanssa kuivatavat maaperää ja kasvattavat sen lämpöresistanssia yhdestä jopa 1,5 – 2,5 Km/W:iin. Sateettomat ja kuivat hellejaksot ovat Helsingin alueella kuitenkin hyvin lyhytkestoisia, ja kaapeliputket on asennettu kaapelihiekkaan, joten valitaan lämpöresistiivisyyden korjauskertoimeksi *taulukon 11* mukaan lämpöresistiivisyyttä 1,2 Km/W vastaava arvo 0,92. [30.]

Määritetään talvi- ja kesäajan lämpötilaerojen johdosta erilliset maaperän lämpötilan korjauskertoimet *taulukosta 12*. Keskikesällä maaperän lämpötila on korkeimmillaan noin +20 °C ulkolämpötilan noustessa yli +30 °C-seen. Voidaan kuitenkin olettaa kyseisen tilanteen olevan lyhytkestoinen vallitsevan ilmaston johdosta. Käytetään kesäajan korjauskertoimena maaperän lämpötilaa +15 °C vastaavaa arvoa 1,00. Maaperän lämpötilan laskiessa talveksi valitaan korjauskertoimeksi +10 °C vastaava 1,05. [30.]

Edellä olevien korjauskertoimien avulla voidaan määrittää kaapeleille niiden jatkuva kuormitettavuus, mutta kuormituksen vuorokausivaihtelun huomioimiseksi käytetään Senerin verkostosuositus SA 5:94 mukaan korjauskerrointa 1,15. [19, s. 6.]

Hätäkuormitusta määrittäessä jätetään vaihtelevan kuormituksen korjauskerroin pois laskusta, sillä hätäkuormitustilanteet ovat luonteeltaan lyhytkestoisia. Hätäkuormitettavuuskerroin on 1,30. [19, s. 7.]

Taulukko 16. Korjauskertoimet kuormitettavuusrajojen määrittämiseen [15, 19]

Kaksi kaapelia vierekkäin putkissa	0,75
Asennussyvyys (1,31-1,50m)	0,95
Maaperän lämpöresistiivisyys (1,2 Km/W)	0,92
Maaperän lämpötila (+15/+10 °C)	kesä 1,00/talvi 1,05
Vaihteleva kuormitus	1,15
Hätäkuormitettavuus	1,30

Määritetyt kuormitettavuusrajat

Kuormitettavuusrajat on määritetty *taulukossa 6* annettujen oletusasennusolosuhteissa olevien maahan asennettujen kaapeleiden kuormitettavuusrajojen, sekä edellä määritettyjen korjauskertoimien mukaan (*taulukko 17*).

Taulukko 17. Ehdotus HSV:n keskijänniteverkon uusista kuormitettavuusrajoista.

Kaapeli	AHXAMK-W 3x240		AHXAMK-W 3x300	
Kuormitettavuus oletusolosuhteissa	385 A		435 A	
Kuormitettavuus tyyppi	Kuormitettavuus	Hätäkuormitettavuus	Kuormitettavuus	Hätäkuormitettavuus
Kesä	290 A	320 A	328 A	362 A
Talvi	305 A	337 A	344 A	380 A

Taulukossa 17 olevat kuormitettavuusrajat on määritetty sellaisille sähköasemalähdöille, joiden suurimman kuormitusvirran vaikutusalueella on ainoastaan AHXAMK-W-tyyppistä kaapelia. Kyseisiä rajoja ei siis voida ottaa suoraan käyttöön koko keskijänniteverkon alueella, mutta niitä voidaan hyödyntää yksittäisillä sähköasemilla sekä johtolähdöillä, jotka koostuvat AHXAMK-W-kaapeleista. Verkon saneerauksen edetessä uusien kuormitettavuusrajojen käyttöalue tulee laajenemaan APYAKMM-, PLKVJ- ja PYLKVJ-kaapeleiden poistuessa verkosta. *Taulukosta 18* nähdään nyt määritettyjen kuormitettavuusrajojen muutos vanhoihin kuormitettavuusrajoihin nähden.

Taulukko 18. AHXAMK-W 3x240-kaapelille määritettyjen kuormitettavuusrajojen vertailu.

Kaapeli	AHXAMK-W 3x240			Rajojen nousu	
	Vanhat rajat		Uudet rajat		
Jännitealue	10 kV (A)	20 kV (A)	10 ja 20 kV (A)	10 kV (%)	20 kV (%)
Kesä	275	230	290	5,5	26,2
Talvi	295	250	305	3,3	21,9

AXW300-kaapeleille saatuja kuormitettavuusarvoja käytettäessä lähdöt tulee tarkastaa tapauskohtaisesti, sillä useimmat tällä kaapelityypillä varustetut lähdöt jatkuvat ensimmäisen muuntamon jälkeen joillain muilla keskijänniteverkossa olevilla kaapelityypeillä. Tarkastelussa tulee huomioda, kuinka suuri osa kuormasta on ensimmäisen muuntamon syöttöpiirissä, ja kuinka suuri osa kuormitusvirrasta jää muuntamolta lähtevälle keskijännitekaapelille.

Hätäkuormitettavuusarvoja voidaan ajatella käytettäväksi tapauskohtaisesti tilanteen vaatiessa. Ylikuormituksen ollessa pidempikestoista ja vaihtelevaa voidaan harkita vaihtelevan kuormituksen korjauskertoimen (1,15) käyttöä myös hätäkuormitettavuus tilanteissa, jolloin hetkellinen kuormitettavuus nousisi huomattavasti *taulukossa 17* olevia arvoja korkeammaksi. Hätäkuormitettavuuden määrittämisessä on asetettu sen kestoksi enintään 50 h yhtäjaksoista kuormitusta. Tarvittaessa hätäkuormitettavuuden korjauskerrointa (1,3) voidaan siis mahdollisesti nostaa kuormitusjakson ollessa huomattavasti lyhytaikaisempi. Esimerkkinä 10 kV:n maasta erotetussa verkossa tapahtuvan maasulun aikaisen vikavirran aiheuttama mahdollinen ylikuormitustilanne, jossa vikaantuneeseen vaiheeseen kumuloituneet jopa yli 100 A:n kapasitiiviset loisivirrat nostavat vaihejohtinta

kuormittavaa kokonaisvirtaa usein noin 50 A:n verran. Maasulkutilanteessa verkon käyttöä voidaan jatkaa enintään 2 h, jos vikapaikka ei ole tiedossa ja kosketusjännitteet pysyvät tarpeeksi alhaisina. Verkon käyttöä voidaan jatkaa maasulkutilanteessa yli 2 h, jos vikapaikka on tiedossa eikä vika aiheuta hengenvaaraa tai omaisuuden vaaraa. Käytännössä HSV:n verkossa maasulkupaikka saadaan paikallistettua ja erotettua verkosta alle 2 h:ssa, jolloin ylikuormitustilanne on kestoalta huomattavasti 50 tunnin annettua aikaa lyhyempi ja tuo lyhytaikainen kuormitusvirran nousu voidaan sallia. HSV:n keskijänniteverkon maasulkusuojaus on laukaiseva, vikavirran noustessa yli 200 A:n. Todellisuudessa maasulkuvirroista aiheutuva kaapelin kokonaisvirran nousu ei ole kovin merkittävä tekijä kuormitettavuuden kannalta, ellei sähköasemalähtö ole jo valmiiksi maksimikuormassaan. [31.]

Nykyisin käytössä oleva kesä- ja talvirajojen vuorottelu, joka on ennalta määrättyjen ajanjaksojen pituinen, voitaisiin tehdä myös ulkolämpötilojen mukaan. Ainakin on syytä tarkkailla vuodenaikojen lämpötilojen kehitystä ja tehdä rajojen vaihteluakatauluun muutoksia tarpeen vaatiessa. [32.]

7.4 Rajojen muutosten vaikutus

Kuormitettavuusrajojen päivittäminen uusiin *luvussa 7.3* määritettyihin raja-arvoihin vaikuttaa keskijänniteverkon suunnitteluun sekä verkon käytön suunnitteluun. Määritetyt AHXAMK-W-kaapeleiden kuormitettavuusarvot ovat huomattavasti aikaisemmin käytettyjä raja-arvoja (*taulukko 3*) suurempia, etenkin vanhojen 20 kV:n verkossa käytettyjen kuormitettavuusrajojen osalta.

Kuormitettavuusrajoilla on suora vaikutus verkon käyttöön, vikatilanteisiin liittyvien kytkentöjen ja varautumissuunnitelmien yhteydessä tehtävien korvauskytkentöjen suunnittelun osalta. Kuormitettavuusrajojen nousun myötä varautumissuunnitelmissa tehtäviä korvauskytkentöjä voidaan mahdollisesti yksinkertaistaa, sillä uusien kuormitettavuusrajojen mukaan yksittäisten lähtöjen kuormitettavuus kasvaisi kesäisin jopa 60 A ylärajan ollessa 290 A ja talvisin 55 A ylärajan ollessa 305 A. Kytkenät voitaisiin mahdollisesti toteuttaa yksinkertaisemmilla muuntamokytkennöillä käyttäen muuntamoautomaatiolla varustettuja muuntamokojeistoja korvauskytkentöjen suorittamisen nopeuttamiseksi. HSV:n verkossa on tällä hetkellä 390 kaukokäytettävää muuntamoa, ja uusia kohteita

kaukokäytön piiriin päivitetään jatkossakin. Mahdollisesti kaikki korvauskytkennät voitaisiinkin toteuttaa kaukokäytettävien muuntamoiden avulla, jolloin paikanpäällä tehtävien kytkentöjen tarve vähenisi. Sitä kautta kytkentöjen suorittaminen tehostuisi.

Keskijänniteverkon suunnittelussa HSV:ssä käytetään nyrkkisääntönä AHXAMK-W-tyyppisille kaapeleille 300 A:n kuormitettavuutta, jolloin verkon käytössä olevien kuormitettavuusrajojen nostolla ei ole suoraa vaikutusta verkon suunnitteluun. Kuormitettavuuksien tarkastelun tulosten varjossa voidaan kuitenkin miettiä nykyisten verkon suunnitteluperusteiden mahdollisia muutoskohtia. HSV:n keskijänniteverkkoa suunnitellaan ja rakennetaan mahdollisimman vahvaksi hyödyntämällä uusien kaapelireittien silmukoimista vanhojen reittien yhteyteen, vaikka vanhoja kaapelireittejä voitaisiinkin jo verkon rakenteen puolesta mahdollisesti poistaa kokonaan käytöstä.

Verkon silmukointia ei ole syytä lisätä loputtomiin, vaan ennen kaikkea kannattaa panostaa jo kehitettyjen rakenteiden tehokkaaseen käyttöön. Vanhoista käyttämättömistä kaapelireiteistä luopuminen selkeyttäisi verkon rakennetta, mikä tekisi verkon käytöstä yksinkertaisempaa ja varmempaa. Kaapeleiden kehittyneiden ominaisuuksien ja kojeistojen paremman käytettävyyden seurauksena verkon rakennetta ei ole välttämättä järkevää vahvistaa ylimääräisillä silmukakäytöksillä, vaan voitaisiin keskittyä yhä enemmän verkon taloudelliseen rakentamiseen verkon erillissuunnittelun kautta. Verkkoa suunniteltaessa on aina taipumus ylimitoitukseen suunnittelun eri vaiheissa lopputuloksen riittävyyden takaamiseksi, mutta nykyisten käytössä olevien tietojärjestelmien mahdollistama verkkotiedon keruu ja sen analysointi mahdollisuudet kannustavat luomaan entistä tarkempia ja taloudellisempia verkon mitoitusperusteita. [33; 34.]

8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tarkasteltiin kaupunkiverkon keskijännitekaapeleiden kuormitettavuutta ja HSV:n käytönvalvontajärjestelmässä käytettyjä kuormitettavuusrajoja. Keskijänniteverkon kuormitettavuus on noussut yleisesti kaapelityypin ja kaapeleiden poikkipintojen päivityksen seurauksena, sillä nykyisin asennettavien AHXAMK-W-tyyppisten kaapelien kuormituskestoisuus on selvästi vanhoja APYAKMM-, PLKVJ- ja PYLKVJ-tyyppisiä kaapeleita korkeampi.

Ajatus käytettävien kuormitettavuusrajojen päivittämiseen lähti siitä, kun selkeitä määrittäisperusteita käytössä oleville kuormitettavuusrajoille ei tiedetty ja rajat olivat käytössä jo ennen PEX-eristeisten kaapeleiden käyttöönottoa. Käytetyt kuormitettavuusrajat olivat myös huomattavasti kaapelivalmistajien ilmoittamia rajoja pienemmät. Tässä työssä määritetyt kuormitettavuusrajat tehtiin nimenomaan AHXAMK-W-kaapeleista koostuvalle keskijänniteverkolle SFS 5636 -standardin ja Sener verkostosuositus SA 5:94:n pohjalta. Raja-arvot pätevätkin vain AHXAMK-W-kaapeleista rakentuviin sähköasemalähtöihin.

Kaapeleiden kuormitettavuuteen vaikuttavia tekijöitä tutkittaessa ja erilaisten kaapeli-asennustapojen vaikutusta kuormitettavuuteen selvitetessä kävi ilmi, että HSV:n keskijänniteverkossa kuormitettavuuden kannalta epäedullisin verkon kohta on maahan putkeen asennettu maakaapeli. Sähköasemalähdöillä kuormitettavuus määräytyy asemalähdön syöttämien kaapelityyppien mukaan, joihin suurin kuormitusvirta vaikuttaa.

Verkon käyttöä ja nykyisiä kuormitusvirtoja tutkiessa selvisi, että kuormitettavuusrajoja ylittäviin kuormitusvirtoihin päästään lähes poikkeuksetta vain sähköasemien korvaustilanteissa, joissa aseman kuormat korvataan kokonaisuudessaan muiden sähköasemien avulla keskijänniteverkon kautta. Suuret vikavirrat eivät vaikuta kuormitettavuusrajojen määrittämiseen niiden lyhyen keston vuoksi.

Vanhat kuormitettavuusrajat oli määritetty erikseen 10 ja 20 kV:n jännitealueille. Tästä jaosta luovuttiin uusia rajoja määritettäessä, sillä nykyisin verkkoa rakennetaan molempien jännitealueiden osalta samoilla AXW240- ja AXW300-kaapeleilla. Uudet kuormitettavuusrajat osoittautuivat huomattavasti vanhoja käytettyjä rajoja suuremmiksi. Merkittävintä 26 %:n kasvu tapahtui vanhan 20 kV:n jännitealueella käytetyn kesärajan (230 A) ja uuden AXW240-kaapelilla rakennetun verkon kesän kuormitettavuusrajan (290 A) välillä. AXW300-kaapelille lasketut kuormitettavuusrajat ovat vielä selkeästi suurempia kuin AXW240-kaapelin rajat, mutta näiden hyödyntäminen nykyisessä verkossa ei ole vielä ajankohtaista AXW300-kaapeleiden vähäisyyden ja asemalähtöjen suhteellisen pienien kuormitusvirtojen vuoksi.

Kuormitettavuusrajojen nostaminen työssä määritettyihin arvoihin vaikuttaa suoraan verkon käytön suunnitteluun mahdollistaen sähköasemien korvaussuunnitelmissa käytettä-

vien korvauskytkentöjen, sekä verkolla tehtävien väliaikaisten kytkentöjen yksinkertaistamisen. Kaapeleiden kuormitettavuuden kasvun ja kehittyneen tiedonkeruun myötä myös verkon suunnitteluperiaatteiden kehitystä on syytä tarkastella.

Ennen työssä määritettyjen kuormitettavuusarvojen käyttöönottoa täytyy verkkoa kartoittaa yksityiskohtaisemmin. Käytettäessä AHXAMK-W-tyyppisille kaapeleille määritettyjä raja-arvoja sähköasemälähdöillä, tulee varmistua lähtöjen perässä olevien kaapeleiden oikeasta tyypistä. Onkin syytä katsoa, että lähdön suurimman kuormitusvirran vaikutuspiirissä on vain lähdölle määrättyjen kuormitettavuusrajojen mukaisia kuormitusvirtoja kestäviä kaapeleita, muussa tapauksessa raja-arvot täytyy määrittää tilannekohtaisesti.

Kuormitettavuusrajoja ylittäviä virtoja on syytä välttää verkon käytössä. Tilanteen vaatiessa kaapelin kuormitusvirtaa voidaan mahdollisesti nostaa Verkostosuositus SA 5:94:n mukaan määritettyjen hätäkuormitettavuusrajojen puitteissa. Verkostosuosituksilla ei ole kuitenkaan samanlaista viranomaisasemaa kuin SFS-standardeilla, joten kaapeleiden hätäkuormitusta on syytä harkita tarkasti. Yksityiskohtaisen tarkastelun jälkeen sähköasemälähtöjen osalta olisi hyvä määrittää selkeyden vuoksi yksi yleisesti keskijänniteverkolla käytettävä ehdoton kuormitusvirran raja-arvo, jota ei ylitettäisi missään tilanteessa.

Lähteet

- 1 Helen Sähköverkko Oy. 2012. Jakeluverkon uudistamisperiaatteet 27.1.2012. Sisäinen dokumentti, ei julkaistu.
- 2 Helen-konsernin internetsivut. 2015. Helen konserni. <<https://www.helen.fi/kotitalouksille/neuvoa-ja-tietoa/tietoa-meista/organisaatiomme/helen-konserni/>> Luettu 23.11.2015.
- 3 Helen Oy:n vuosikertomus 2014. Verkkodokumentti. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/vuosikertomus/vuosikertomus-2014/konsernin-vuosi/konsernin-tilinpaa-tos/toimintakertomus/>> Luettu 23.11.2015.
- 4 Helen Sähköverkko Oy yritystietoa. 2015. Helen Sähköverkko Oy. Sisäinen dokumentti, ei julkaistu.
- 5 Helen Sähköverkko Oy. 2015. Helen Sähköverkko Oy:n yritysesitys 2015. Sisäinen dokumentti, ei julkaistu.
- 6 Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. 2012. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Otatieto Oy.
- 7 Elovaara, Jarmo. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. Espoo: Otatieto Oy.
- 8 Partanen, Jarmo. 2011. Maasulkusuojaus. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 9 Sipiläinen, Ari, käytönsuunnittelupäällikkö; Vepsäläinen, Jukka, kunnossapitopäällikkö. 2015. Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Keskustelut 1.11.2015-15.1.2016.
- 10 Sippola, Vesa. 2015. Verkkojen erityispiirteitä. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 11 Elovaara, Jarmo. 2011. Sähköverkot 2. Helsinki: Otatieto Oy.
- 12 Vepsäläinen, Jukka. 2014. Mittaavan kunnossapidon hyödyntäminen keskijänniteverkon häiriöiden vähentämisessä ja elinkaarihallinnassa. Diplomityö. Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu.
- 13 Simonen, Vesa-Matti. 2009. Keskijännitekaapeleiden terminen kuormitettavuus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

- 14 Reka kaapeli Oy:n verkkosivut. Keskijännitekaapeli AHXAMK-W 20 kV. <<http://www.reka.fi/keski-ja-suurjannitekaapelit/keskijannitekaapelit/keskijannitekaapeli-ahxamk-w-20-kv>>. Verkkosivu. Luettu 17.11.2015.
- 15 SFS 5636. PEX-eristeiset 10, 20 ja 30 kV AL- ja CU-voimakaapelit. Rakenne ja testaus. 2014. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. *HD 620 S2 Part 10: XLPE insulated single core and 3 core cables, and single core pre-assembled cables, 5 Current carrying capacity.*
- 16 Mikkola, Juha. 2016. Laatuasiantuntija, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Keskustelu 18.1.2016
- 17 Suomi, Mika. 2010. Kosketussuojan poikkipinnan vaikutus 60 – 400 kV suurjännitekaapelin kuormitettavuuteen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 18 Lakervi Erkki. 1996. Sähkönjakeluverkkojen suunnittelu. Helsinki: Otatieto Oy.
- 19 Verkostosuositus SA 5:94. Keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki: Sähköenergialiitto ry Sener.
- 20 Tampereen Sähköverkko Oy, JE-Siirto Oy, Pori Energia Sähköverkot Oy, Vantaan Energia Sähköverkot Oy. 2015. Sähköpostikysely 8.12.2015.
- 21 Karjalainen, Jukka. 2015. Sähköverkonrakennuttaja, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Keskustelu 3.12.2015.
- 22 Pesonen, Ismo; Riekkinen, Jani; Hietanen, Jari; Knief, Leif; Reiman, Jorma; Heikkinen, Jouko. 2015. Jakeluverkon kunnossapito, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Keskustelut 1.11.- 31.12.2015.
- 23 Aro, Martti; Elovaara, Jarmo; Karttunen, Matti; Nousiainen, Kirsi; Palva, Veikko. 2011. Suurjännitetekniikka. Helsinki: Otatieto Oy.
- 24 Murumäki, Tuomas. 2015. Rakennuttajapäällikkö, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Keskustelu 1.12.2015.
- 25 Hankekuvat. 2015. Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Sisäinen dokumentti, ei julkaistu.
- 26 Häiriöraportti. 2009. Sähköasemahäiriö Pitäjänmäki, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Sisäinen dokumentti, ei julkaistu.
- 27 Pakarinen, Kirsi. 2014. Kampin sähköaseman korvaussuunnitelma. Sisäinen dokumentti, ei julkaistu.

- 28 Kivisaari, Risto. 2015. Suunnittelupäällikkö, Prysmian Finland Oy, Pikkala. Sähköpostikeskustelut 12.2015 aikana.
- 29 Muovit rakentamisessa, rakennuspolyuretaanituotteet. Verkkodokumentti. <<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK00s703.pdf>>. Luettu 13.12.2015.
- 30 Hakala, Sanna. 2011. Ulkolämpötilan vaikutus kj-kaapeleiden vikaantumisherkyyteen, Helen Sähköverkko Oy. Sisäinen dokumentti, ei julkaistu.
- 31 Loukkalahti, Mika. 2015. Järjestelmäpäällikkö, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 23.11.2015.
- 32 Orpana, Jukka. 2015. Järjestelmäpäällikkö, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 29.12.2015.
- 33 Seppänen, Risto. 2015. Yleissuunnitteluinsinööri, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Keskustelu 29.12.2015.
- 34 Olkkonen, Rauno. 2015. Projektipäällikkö, Helen Sähköverkko Oy, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 29.12.2015.

Kaapelin kuormitettavuus läpiviennissä

Prysmian Finland Oy:n toimesta lasketut AHXAMK-W-kaapelin kuormitettavuudet polyuretaaniläpivienneissä.

PRYSMIAN Finland Oy
Tuote- ja järjestelmäsuunnittelu

Laskelma

21.12.2015 1(1)

KAAPELIN KUORMITETTAVUUS LÄPIVIENNISSÄ

Ohjelmaversio 1.2a 10.02.2003 RK

LÄHTÖTIEDOT :

Kaapeli ilma-asennuksessa		
- tyyppi	AHXAMK-W 3x240+70 20kV	
- kuormitettavuus (ympäristö 25 °C)	385 A	
- johdinlämpötila	65 °C	

Kaapelin rakenne

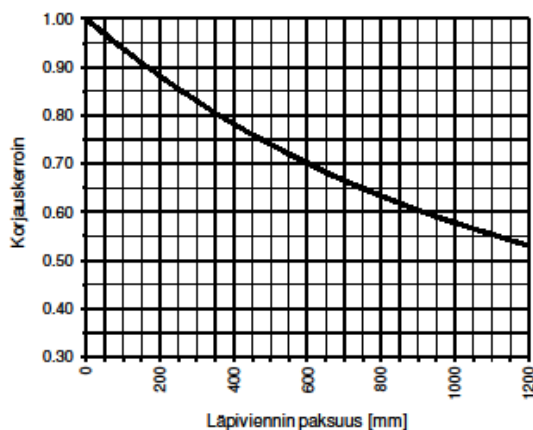
VAIHEJOHTIMET, lukumäärä		3 kpl
- materiaali (Al, Cu, Fe)	Al	
- poikkipinta	240 mm ²	
- resistanssi	0.150 ohm/km	
NOLLAJOHTIMET, lukumäärä		3 kpl
- materiaali (Al, Cu, Pb, Fe)	Al	
- poikkipinta	34 mm ²	
MUUT METALLIKERROKSET, lukumäärä		1 kpl
- materiaali (Al, Cu, Pb, Fe)	Cu	
- poikkipinta	70 mm ²	

Läpivienti

- materiaali	Polyuretaani	
- materiaalin lämpöresistiivisyys	45 Km/W	
- ympäristön lämpötila	15 °C	

TULOKSET:

Läpiviennin paksuus mm	Kuormitettavuus A	Korjauskerroin
50	373	0.969
100	361	0.939
150	350	0.910
200	339	0.882
300	329	0.830
400	320	0.783
500	301	0.740
600	285	0.701
700	270	0.665
800	256	0.633
900	244	0.604
1000	233	0.577
1200	222	0.530



Viite: Temperature rise of cables passing through short lengths of thermal insulation.
ERA Report No. 85-0111, Project No. 24/03/2299, julkaistu 1987.

Kuormitettavuuslaskennan taulukot

Yhteenveto tämän insinööriyön kuormitettavuuslaskennoissa käytetyistä taulukoista, jotka pohjautuvat Sener verkostosuositus SA 5:94:n ja standardin SFS 5636 taulukoihin.

Taulukko 6. AHXAMK-W-kaapeleille annettuja kuormitettavuuden raja-arvoja oletusolosuhteissa [15]

Nimellinen poikkipinta-ala (mm ²)	Maa-asennus +15 °C				Ilma-asennus +25 °C			
	Johtimen lämpötila +65 °C				Johtimen lämpötila +90 °C			
	Taso		Kolmio		Taso		Kolmio	
	Kosketussuojapiiri		Kosketussuojapiiri		Kosketussuojapiiri		Kosketussuojapiiri	
	Avoin (A)	Suljettu (A)	Avoin (A)	Suljettu (A)	Avoin (A)	Suljettu (A)	Avoin (A)	Suljettu (A)
240	435	395	395	385	570	515	505	490
300	485	440	445	435	650	580	580	565

Taulukko 7. Korjauskertoimet ilman lämpötilan vaikutukselle kuormitettavuuteen [15]

Johtimen sallittu lämpötila [°C]	Ilman lämpötila [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
90	1,12	1,08	1,04	1,00	0,95	0,9	0,85	0,80	0,74	0,68
80	1,14	1,09	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,69	0,61
70	1,18	1,12	1,06	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,62	0,52
65	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,85	0,77	0,68	0,57	0,45

Taulukko 8. Korjauskertoimet AHXAMK-W-kaapeliryhmille ilma-asennuksissa [15]

Asennustapa		Kaapelit kiinni toisissaan Kaapelit kiinni seinässä, lattiassa tai katossa				
Kaapelien lukumäärä		1	2	3	6	9
Lattialla		Korjauskerroin				
		0,9	0,84	0,8	0,75	0,73
Kaapelitikkailla	Tikkaiden lukumäärä					
	1	0,95	0,84	0,80	0,75	0,73
	2	0,95	0,80	0,76	0,71	0,69
	3	0,95	0,78	0,74	0,70	0,68
	6	0,95	0,76	0,72	0,68	0,66
Seinällä		0,95	0,78	0,73	0,68	0,66

Taulukko 9. Korjauskertoimet AHXAMK-W-kaapeliryhmien vaikutukselle maa-asennuksessa [15]. (Käytetään joko taulukon 9 arvoja, tai taulukon 13 arvoja)

Monijohdinkaapeleiden välinen etäisyys mm	Vierekkäisten AHXAMK-W-kaapeleiden lukumäärä						
	2	3	4	5	6	8	10
0	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
70	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
250	0,87	0,79	0,75	0,72	0,69	0,66	0,64

Taulukko 13. Korjauskertoimet putkeen asennettujen AHXAMK-W-kaapeliryhmien vaikutukselle maa-asennuksessa [15]. (Käytetään joko taulukon 9 arvoja, tai taulukon 13 arvoja)

Putkitettujen monijohdinkaapeleiden välinen etäisyys mm	Vierekkäisten putkitettujen AHXAMK-W-kaapeleiden lukumäärä							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0,8	0,75	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55	0,50
70		0,75	0,70	0,65	0,60	0,60	0,55	0,55
250		0,75	0,70	0,70	0,70	0,65	0,65	0,65

Taulukko 10. Korjauskertoimet 6-30 kV kaapeleiden asennussyvyyden vaikutukselle maa-asennuksessa [15]

Asennussyvyys	0,50-0,70	0,71-0,90	0,91-1,10	1,11-1,30	1,31-1,50
korjauskerroin	1,00	0,99	0,98	0,96	0,95

Taulukko 11. Korjauskertoimet eri maaperän lämpöresistiivisyyksien vaikutukselle maa-asennuksessa [15]

Maaperän lämpöresistiivisyys [Km/W]	0,7	1,0	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0
korjauskerroin	1,10	1,00	0,92	0,85	0,75	0,69	0,63

Taulukko 12. Korjauskertoimet maaperän lämpötilan vaikutukselle [15]

Johtimen sallittu lämpötila (°C)	Maaperän lämpötila (°C)										
	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
90	1,13	1,10	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,82	0,77
80	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73
70	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,73	0,67
65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63

Taulukko 2. Häätäkuormitettavuuskertoimet [19]

Kaapelityyppi	Johtimen maksimilämpötila häätäkuormituksella (°C)	Häätäkuormitettavuuskerroin	
		Kaapeli ilmassa +25 °C	Kaapeli maassa +15 °C
12-24 kV paperieristeinen	95	1,26	1,20
1-24 kV PEX-eristeinen	130	1,20	1,30